

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY V PASIVNÍCH OPTICKÝCH SÍTÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN ŠVELA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY V PASIVNÍCH OPTICKÝCH SÍTÍCH

COMMUNICATION PROTOCOLS IN PASSIVE OPTICAL NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN ŠVELA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR TEJKAL

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Martin Ševela

ID: 70103

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Komunikační protokoly v pasivních optických sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je zhodnocení současně používaných standardů pro pasivní optické sítě. U jednotlivých standardů se zaměříte na používané komunikační protokoly a vzájemně porovnejte jejich vlastnosti. Uveďte, jaké jsou možnosti přenosu televizního signálu v PON a zvažte výhody a nevýhody jednotlivých řešení. Uveďte možnosti realizace pasivní optické sítě s vlnovým dělením a zaměřte se na používané pasivní prvky. Cílem diplomové práce je provést návrh sítě PON a WDM-PON za účelem porovnat přenosové vlastnosti. Při návrhu se také zaměřte na technologické možnosti jednotlivých řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelectronics for telecommunications and informations. Texas: Inc., Publishers, 2009. ISBN 978-0-615-33185-0
- [2] GIRARD, A. FTTx PON Technology and Testing. EXFO Electro-Engineering Inc., Quebec City, Canada, 2005

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Tejkal

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá porovnáním přenosových parametrů v sítích s časovým dělením a v sítích s vlnovým dělením. V první části práce jsou nastudovány jednotlivé standardy sítí s časovým dělením a specifiky sítí s vlnovým dělením, společně s používanými pasivními prvky pasivních optických sítí. Druhá část stručně popisuje možnosti přenosu televizního signálu v optických sítích. Třetí část je věnována simulaci sítí GPON a WDM-PON a srovnání nasimulovaných hodnot.

KLÍČOVÁ SLOVA

optická přístupová síť, vlnové dělení, časové dělení, simulace, přenosové standardy

ABSTRACT

This master's thesis explores a comparison of the transmission parameters in time division networks and wavelength division networks. The paper is divided into the three sections. The first part deals with preparation of individual standards time division networks and specific wavelength division networks, along with passive components used passive optical networks. The second part briefly describes the possibility of transmission of television signals in optical networks and the last part is devoted to simulating networks GPON and WDM-PON and comparison simulated values.

KEYWORDS

Optical Access Network, wavelength division, time division, simulation, transmission standards

ŠEVELA, Martin *Komunikační protokoly v pasivních optických sítích*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 60 s. Vedoucí práce byl Ing. Vladimír Tejkal

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Komunikační protokoly v pasivních optických sítích“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Tejkalovi, za užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce. Zvláštní poděkování patří Ing. Janu Látalovi a Radku Pobořilovi z Vysoké školy báňské – technické univerzity Ostrava, Fakulty elektrotechniky a informatiky, katedry telekomunikační techniky za odborné rady.

OBSAH

Úvod	12
1 Pasivní optické přístupové sítě	13
1.1 Standardy APON/BPON	14
1.1.1 Protokol ATM	15
1.1.2 Datový přenos	16
1.2 Standard GPON	17
1.2.1 Vrstvový model GPON	18
1.3 Struktura GEM rámce	19
1.4 Standard XGPON	21
1.5 Standard EPON	23
1.5.1 Skladba Ethernetového rámce	24
1.6 Standard 10GEPON	25
1.7 Přidělování přenosové kapacity	26
1.7.1 Procedura DBA a SBA	26
1.7.2 Protokol MPCP	27
2 Přenos televizního signálu v optických přístupových sítích	28
2.1 CATV	28
2.2 IPTV	28
2.3 Srovnání možností přenosu TV signálu	29
3 Vlnové dělení WDM	30
3.1 WDM-PON sítě	32
3.1.1 Typy možných realizací WDM-PON	32
3.2 Pasivní prvky používané v PON a WDM-PON	34
3.2.1 Muldexy	34
3.2.2 Optické cirkulátory	36
3.2.3 Interleavry	37
4 Simulace	38
4.1 Síť GPON	38
4.1.1 Optické linkové zakončení	38
4.1.2 Optická distribuční síť	38
4.1.3 Koncová jednotka	39
4.2 Síť WDM-PON	39
4.2.1 Optické linkové zakončení	40
4.2.2 Optická distribuční síť	41

4.2.3	Koncová jednotka	42
4.3	Měřicí přístroje v Optisystému	42
4.3.1	Power Meter - PM	42
4.3.2	Optický spektrální analyzátor - OSA	42
4.3.3	Vizualizace optického signálu v čase - OTDV	42
4.3.4	WDM Analyzer	43
4.3.5	BER Analyzer	43
4.4	Výsledky simulací	44
4.4.1	Srovnání hodnot bitové chybovosti a diagramů oka	44
4.4.2	Měření na trase	48
5	Závěr	52
	Literatura	54
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	56
	Seznam příloh	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vlevo schéma přenosu směrem k uživateli a vpravo schéma přenosu směrem od uživatele.	13
1.2	Vývoj standardů optických přístupových sítí [10].	14
1.3	Vrstvový model GPON.	19
1.4	Struktura GEM rámce.	20
1.5	Přenosový rámec GPON ve směru k uživateli.	20
1.6	Přenosový rámec GPON ve směru od uživatele.	21
1.7	Přenosový rámec EPON.	25
3.1	Kanály s odstupem vlnových délek 20 nm v pásmech S, C a L.	32
3.2	WDM-PON s využitím směrové odbočnice AWG.	33
3.3	WDM-TDM-PON s využitím směrové odbočnice AWG v kombinaci s pasivním rozbočovačem.	34
3.4	Princip de/multiplexace vlnových délek pomocí metody AWG.	36
3.5	Symbol znázorňující optický cirkulátor.	36
4.1	OLT jednotka navrhované GPON sítě.	39
4.2	Optická distribuční síť u GPON.	39
4.3	Jednotka ONT pro síť GPON	40
4.4	OLT jednotka navrhované WDM-PON sítě.	41
4.5	Zapojení optické distribuční sítě pro WDM-PON.	41
4.6	Diagram oka s popisem.	43
4.7	Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT 1 v síti GPON, s 8 koncovými uživateli.	44
4.8	Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT v síti WDM-PON, s 8 koncovými uživateli a 20 km vlákna.	45
4.9	Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT v síti GPON se 4 koncovými uživateli a 20 km vlákna.	46
4.10	Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT v síti WDM-PON se 4 koncovými uživateli a 20 km vlákna.	47
4.11	Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT v síti WDM-PON s 8 koncovými uživateli a 45 km vlákna.	47
4.12	a) Výstupní signál z ONT 1 v síti GPON pro 8 koncových uživatelů, b) Výstupní signál z ONT 3 v síti GPON pro 8 koncových uživatelů.	48
4.13	a) Signál ve vzestupném směru v síti GPON pro 8 koncových uživatelů, měřeno na výstupu z rozbočovače, b) signál ve vzestupném směru v síti GPON pro 8 koncových uživatelů, měřeno na výstupu z cirkulátoru.	49

4.14	a) Signál v sestupném směru v síti GPON pro 8 koncových uživatelů, měřeno na výstupu z vlákna, b) signál v sestupném směru v síti WDM-PON pro 8 koncových uživatelů, měřeno na výstupu z vlákna.	50
4.15	a) Náměr OSA na signálu v sestupném směru k jednotce ONT 3 v síti WDM-PON b) signál v sestupném směru k jednotce ONT 3 v síti WDM-PON.	50
4.16	a) Výstupní signál z ONT 1 v síti WDM-PON pro 8 koncových uživatelů, b) výstupní signál z ONT 3 v síti WDM-PON pro 8 koncových uživatelů.	51
4.17	a) Signál ve vzestupném směru v síti WDM-PON s 8 koncovými uživateli, výstup z AWG, b) signál ve vzestupném směru v síti WDM-PON s 8 koncovými uživateli, vstup do OLT.	51

SEZNAM TABULEK

1.1	Souhrn základních informací o standardu BPON.	15
1.2	Souhrn základních informací o standardu GPON.	18
1.3	Souhrn základních informací o standardu XGPON	22
1.4	Souhrn základních informací o standardu EPON.	24
1.5	Souhrn základních informací o standardu 10GEPON.	26
3.1	Vlnové délky CWDM podle standardu ITU-T G.694.2 [18].	31

ÚVOD

V poslední době přicházejí instituce ITU-T a IEEE s novými přenosovými standardy pro pasivní optické přístupové sítě, společně s nimi se dostávají do popředí přístupové sítě založené na vlnovém dělení. Sítě založené na časovém dělení a standardy pro ně vydané v posledních letech, se dostávají svými přenosovými vlastnostmi na konec svých fyzických možností, stále jsou však více než dostačující pro nabízení služeb široké veřejnosti. S postupem doby se však dá předpokládat další navyšování požadavků koncových uživatelů a s tím nevyhnutelně zvýšení přenosové kapacity. Právě to nám umožňují sítě s vlnovým dělením, které se v poslední době stále více začínají objevovat i v přístupových sítích.

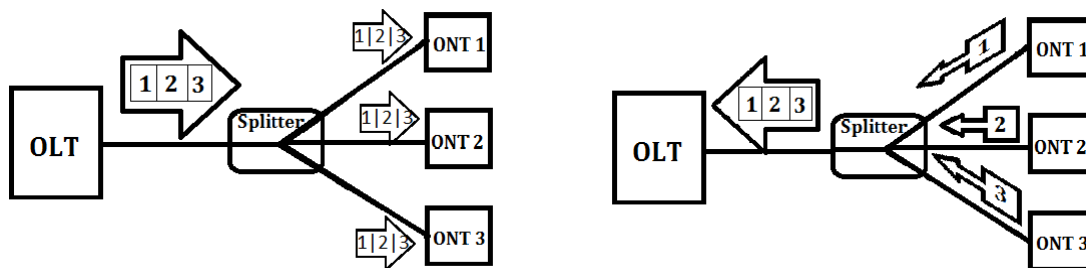
Tato diplomová práce bude zaměřena především na srovnání progresivnější technologie využívající vlnové dělení, se sítěmi založenými na časovém dělení. Srovnání těchto dvou typů přístupových sítí bude založeno na praktické simulaci v softwaru od společnosti Optiwave. Simulace se zaměří především na srovnání kvality sítě, výhody a nevýhody vyplývající z použití časového dělení a vlnového dělení, v dané síti.

Na začátku práce budou popsány základní parametry pasivních optických sítí a základní prvky použité pro přístupové sítě. Jednotlivé standardy budou podrobně rozebrány a na základě nastudování jejich parametrů subjektivně zhodnoceny z hlediska nabízených služeb a přenosových parametrů a zda jsou z tohoto hlediska dostačující pro služby v dnešní době běžně provozované v přístupových sítích. Popis bude též věnován komunikačním protokolům, které jsou používány pro přenos u jednotlivých standardů. U protokolů, které byly používány již před zavedením do standardů pasivních optických přístupových sítí, se popis zaměří především na rozdíly, které bylo nutné pro fungování v PON sítích učinit oproti jejich dřívějšímu používání v běžných sítích. Patří mezi ně například protokol ATM u komunikačního standardu BPON. Popis GEM rámce u standardu GPON a u standardu EPON a 10GEPON popis ethernetového protokolu. Stručně bude také popsán princip přidělování vysílacích okamžiků koncovým jednotkám. Dále se bude práce zabývat popisem technologie vlnového dělení a její specifiky při použití v přístupových sítích a na pasivní prvky sítě, používané především v sítích založených na vlnovém dělení. Jedná se například o pasivní odbočnice AWG, interleavry, cirkulátory, ap. V závěru teoretické části budou popsány způsoby přenosu televizního signálu v pasivních optických sítích. A to jak přenos IPTV, tak přenos klasického analogového televizního signálu.

1 PASIVNÍ OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ

Pasivní optická přístupová síť (PON - Passive optical network, je tvořena sdíleným optickým vláknem. Pro přenos není využíváno žádných aktivních prvků, kromě jednotky OLT (Optical Line Terminal) a koncových jednotek ONT (Optical Network Terminal). K jednotce OLT je přiveden zdrojový signál, ta dále rozesílá signál po sdíleném vlákně až k pasivnímu rozbočovači, který bývá umístěn v blízkosti koncových jednotek. Na straně účastníka je optická síť zakončena jednotkou ONT. V rozbočovači je možné signál rozdělit až na 64 koncových uživatelů, tzv. rozbočovací poměr je definován pro každý standard zvlášť. Maximální vzdálenost mezi OLT a koncovou jednotkou ONT, kterou je standard ještě schopen překlenout je také definována u každého ze standardů jinak a udává ji hodnota fyzického dosahu sítě.

Pro přenos dat více účastníkům, případně od více účastníků, se využívá časového multiplexu TDM (Time Division Multiplex), kdy ve směru k uživateli je datový tok kontinuální a v rozbočovačích je rozdělen mezi všechny koncové jednotky, koncové jednotky pak přijmou pouze data jim určená. Ve směru od uživatele přiděluje OLT jednotlivým koncovým jednotkám časové okamžiky, kdy mohou vysílat. Princip časového dělení v pasivní optické síti je zobrazen na obrázku 1.1

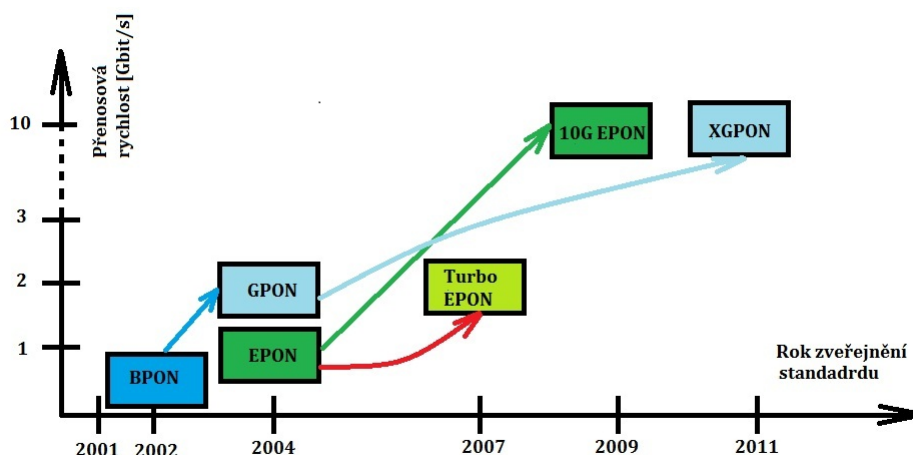


Obr. 1.1: Vlevo schéma přenosu směrem k uživateli a vpravo schéma přenosu směrem od uživatele.

Optické linkové zakončení označované OLT zajišťuje rozhraní mezi sítí telekomunikační a přístupovou. Rozbočovač, neboli splitter, pouze rozdělí optický signál do více vláken. Jedná se čistě o pasivní rozdělení signálu, signál není v rozbočovači nijak zesílen ani upravován, rozbočovač ale vnáší do trasy útlum, který je dán rozbočovacím poměrem. Na straně účastníka je potom optická ukončovací jednotka, která zajišťuje funkce na rozhraní optické části sítě a metalické části sítě, podobnou funkci má i optické síťové zakončení ONT, která zajišťuje funkci účastnického rozhraní mezi koncovým zařízením účastníka a optickou přístupovou sítí. ONU může být umístěna přímo v domě nebo u domu a přímo na ni se připojují jednotliví uživatelé v rámci lokální sítě a často mívá začleněny i porty pro připojení set-top boxu a pro připojení běžných telefonů v rámci poskytování služeb Triple-play, kdy poskytovatel nabízí

mimo datové služby a připojení k internetu i přenos televizního signálu případně IPTV a hlasové služby, jako je klasická telefonie, přenos rozhlasového vysílání, atp.

Pro přenos dat v optické přístupové síti byly definovány přenosové standardy, které budou podrobně popsány dále. Chronologický vývoj standardů s jejich přenosovými rychlostmi představuje obrázek 1.2



Obr. 1.2: Vývoj standardů optických přístupových sítí [10].

1.1 Standardy APON/BPON

APON v dnešní době už častěji označovaný jako BPON (Broadband PON) je prvním standardem používaným v pasivních optických přístupových sítích. V roce 1998 doporučení ITU-T G.983.1 standardizovalo přenos na základě ATM buněk. Přenosové rychlosti jsou nabízeny ve dvou variantách: symetrická služba o rychlosti 155,52 Mbit/s a asymetrická služba ve směru ze sítě k uživateli 622,08 Mbit/s a ve zpětném směru 155,52 Mbit/s. Dodatečně byla doplněna symetrická služba o rychlostech 622,08 Mbit/s [4]. Doporučení označené ITU-T G.983.3 bylo standardizováno roku 2001 a začala se pro něj používat zkratka BPON. Tento standard je rozšířením předchozího standardu.

Pro přenos je možné použít buď dvou separátních kabelů, pro každý směr jeden nebo vlnového dělení. Využití dvou separátních kabelů znamená použití dvojnásobného množství vláken, jakož i optických prvků (rozbočovače, konektory, ...) pro každý směr zvlášť. To je finančně značně nákladné proto se většinou používá jedno vlákno pro oba směry. V takovém případě se pro oddělení směrů přenosu využívá vlnové dělení. Pro variantu s vlnovým dělením bylo zavedeno následující přiřazení pásem. Pro směr k uživateli je použito rozmezí pásem 1480 nm - 1500 nm a pro směr

od uživatele 1260 nm - 1360 nm. Vlnové délky byly zvoleny s ohledem na útlumovou charakteristiku optických vláken. Pro směr od uživatele byla zvolena záměrně nižší vlnová délka, z důvodu levnějších optických zdrojů. Také větší toleranční rozmezí ve směru od uživatele je zavedeno z důvodu použití méně kvalitních optických zdrojů a tím pádem také nižší ceny. Souhrn přenosových parametrů standardu BPON je v tabulce 1.1.

Varianta PON	BPON
standard	ITU-T G.983
přenos. rychlost – sestupný směr	155,52 nebo 622,08 Mbit/s
přenos. rychlost – vzestupný směr	155,52 nebo 622,08 Mbit/s
vlnová délka – sestupný směr	1480-1500 nm
vlnová délka – vzestupný směr	1260-1360 nm
protokol na druhé vrstvě	ATM
max. počet připojených uživatelů	32
fyzický dosah sítě	20 km

Tab. 1.1: Souhrn základních informací o standardu BPON.

Standardy APON a BPON jsou v dnešní době již nedostačující. Jejich přímým následníkem je standard GPON.

1.1.1 Protokol ATM

ATM (Asynchronous Transfer Mode) byl vyvinut sdružením ITU-T (International Telecommunication Union). Snaha protokolu ATM byla vytvořit jednotný síťový standard, s podporou synchronních typů přenosu, sítě založené na paketovém přenosu a s podporou QoS (Quality of service) pro přenos paketů. Navíc v sobě integruje paketový přenos dat a spojování okruhů. Do PON sítí byl protokol zařazen v roce 1998 se zavedením standardu APON.

ATM využívá pro přenos buňky o pevné délce 53 bajtů, které jsou odesílány přes nižší úroveň bitového toku. V PON sítích je tento bitový tok ve směru k uživateli souvislý a ve směru od uživatele je rozdělen na úseky podle toho, jestli uživatel vysílá nebo vyčkává [5]. Pevně daná velikost buňky umožňuje rychlé zpracování na jednotlivých prvcích sítě. Vzhledem k tomu, že prvek ví, jak velké místo bude buňka zabírat, jak dlouho bude trvat její zpracování, příjem a odeslání.

Velikost ATM buňky byla zvolena záměrně 53 bajtů. Je to kompromis pro přenos hlasu a video hovorů v reálném čase kdy je třeba zabezpečit malé zpoždění a přenosem větších dat, kdy je zase výhodnější používat delší bitové úseky.

Skládá se z hlavičky, která má velikost 5 bajtů a informačního pole, které má velikost 48 bajtů. V informačním poli jsou uloženy uživatelská data, případně informace řídicí signalizační systém. Signalizační systém je systém určený pro řízení chodu sítě založené na výměně signalizačních zpráv a proto řídicí informace může generovat jak koncový uzel (například při vyřízení žádosti o vytvoření spojení) tak i jednotlivé uzly ATM sítě (například výměna směrovacích informací) [13]. Hlavička ATM nese informace o zpracování buněk v jednotlivých uzlech sítě, identifikátor virtuální cesty (VPI - Virtual Path Identifier) a identifikátor virtuálního spojení (VCI - Virtual Circuit Identifier). V jednotlivých uzlech sítě se provádí zpracování ATM buňky pouze na základě informací obsažených v hlavičce. Rozlišují se 2 typy hlaviček, které se dělí podle toho, mezi kterými uzly sítě je buňka přenášena. Mezi koncovým bodem a ATM přepínačem se jedná o rozhraní UNI (User Network Interface) nebo mezi dvěma ATM přepínači je to rozhraní NNI (Network to Network Interface).

1.1.2 Datový přenos

Při datovém přenosu v PON sítích, jsou informační buňky s uživatelskými daty a řídicí buňky PLOAM (Physical Layer Operations, Administration and Maintenance) umístěny do časových rámců, které jsou po sdíleném vlákně dopravovány ke koncovým uživatelům. PLOAM buňka v sobě nese například řídicí informace pro fyzickou vrstvu. Ve směru k uživateli obsahuje informace pro ONT přidělující oprávnění k přenosu [5].

Směr sestupný

Ve směru k uživateli je přenos tvořen souvislým tokem dat, pokud nejsou data k vysílání, OLT vysílá prázdné buňky, tzv. výplňové buňky. Jeden časový rámec je tvořen 28 buňkami. Z nichž je jedna buňka vždy PLOAM a zbylých 27 buněk jsou ATM buňky s uživatelskými daty. Pro přenosovou rychlost 155,52 Mbit/s je třeba přenášet dva tyto rámce. To znamená, že je najednou posláno 56 ATM buněk s uživatelskými daty a dvě PLOAM buňky. Logicky potom musí platit, že pro rychlost 622,08 Mbit/s musí být odesláno čtyřnásobné množství těchto rámců, tj. osm rámců. Dohromady to dělá 224 ATM buněk a 8 PLOAM buněk. Pro přenosovou rychlost 1244,16 Mbit/s se toto množství ještě zdvojnásobí. Vzorec 1.1 pro výpočet přenosové rychlosti užitečných dat ve směru k uživateli[9].

$$v_p = v_{fyz} \cdot \frac{27}{28} \cdot \frac{48}{53} \quad [Mbit/s] \quad (1.1)$$

kde:

- v_{fyz} je přenosová rychlost na fyzické vrstvě,
- - 28 je buněk v jednom časovém rámci, z nichž jedna buňka je PLOAM a 27 jsou ATM buňky s uživatelskými daty,
- - 53 je velikost jedné ATM buňky v bajtech, kde tvoří 5 bytů hlavičku a 48 bytů uživatelská data.

Ve směru k uživateli je datový tok vysílán na všechny ONT. Informace o adrese koncové stanice je obsažena v každé buňce a koncová jednotka blokuje každou buňku, která pro ni není určena.

Směr vzestupný

Aby nedocházelo ke kolizím při vysílání jednotlivých koncových stanic je každé koncové jednotce přidělen časový okamžik, kdy má právo vysílat pouze ona. Tyto časové okamžiky rozděluje optické linkové zakončení OLT a informuje koncové stanice pomocí PLOAM buněk. Přidělování vysílacích okamžiků bude popsáno dále. Stejně jako ve směru k uživateli se datový tok skládá do rámců. V tomto případě obsahuje přenosový rámec pro přenosovou rychlost 155,52 Mbit/s 53 časových intervalů. Časový interval obsahuje ATM buňku případně PLOAM buňku o velikosti 53 bajtů a 3 bajtové rozšířené záhlaví, které obsahuje oddělovací ochranný interval o minimální velikosti 4 bity, zajištění bitové a bajtové synchronizace a informace pro detekci začátku ATM buňky. Pro přenosovou rychlost 622,08 Mbit/s obsahuje přenosový rámec 212 časových intervalů. Počet PLOAM buněk v přenosovém rámci není přesně stanoven. Doporučení pouze stanoví, že koncová stanice musí odeslat alespoň jednu PLOAM buňku každých 100 ms.

1.2 Standard GPON

Je přímým nástupcem standardů APON/BPON. Stejně jako předchozí varianta vychází i standard GPON (Gigabit Capable PON) z doporučení ITU-T tentokrát verze G.984.1, která byla uvedena v platnost v roce 2003. Pro přenos je využíváno taktéž ATM buněk a nově protokolu GEM (GPON Encapsulation Method). Tato metoda používá pro přenos GPON rámců, které mají proměnnou délku. ATM buňky i GEM rámce, nebo jejich fragmenty, jsou přenášeny společně v rámci s pevnou délkou 125 μ s. To umožňuje využití paketově orientovaných služeb jako Ethernet či IP [4].

GEM rámce, které mají proměnnou délku, jsou případně rozděleny na menší části tak, aby se daly zapouzdřit do přenosových rámců pevné velikosti. Právě díky možnosti rozdělení GEM rámců na menší úseky je možné lépe pracovat s QoS, kdy je

například možné rychleji zpracovat pakety z vyšší úrovní priority než je tomu například u EPON, který pro přenos používá Ethernetové rámce. Přenosové rychlosti byly stanoveny na 1,244 Gbit/s nebo 2,488 Gbit/s symetricky, případně 2,488 Gbit/s ve směru k uživateli a 1,244 Gbit/s ve směru od uživatele. V zájmu zachování kompatibility se zařízeními používajícími standard APON/BPON byla implementována podpora přenosových rychlostí 155,52 Mbit/s a 622,08 Mbit/s symetricky. Ne všechny zařízení zpětnou podporu standardů APON/BPON zajišťují.

Stejně jako u standardů APON/BPON se pro oddělení směru vysílání používá dvou separátních kabelů nebo vlnové dělení, kde ve směru k uživateli jsou přiřazeny vlnové délky 1260 nm - 1360 nm a ve směru k uživateli vlnové délky v rozpětí 1480 nm - 1500 nm. Větší toleranční rozmezí ve směru od uživatele je zavedeno z důvodu použití méně kvalitních optických zdrojů v jednotkách ONT a z toho plynoucí nižší ceně zmíněných jednotek. Zdroje obsažené v těchto zařízeních vykazují značnou závislost vysílané vlnové délky optického signálu na teplotě, vlhkosti a stáří [9]. Přenosové vlastnosti standardu GPON jsou souhrnně sepsány v tabulce 1.2.

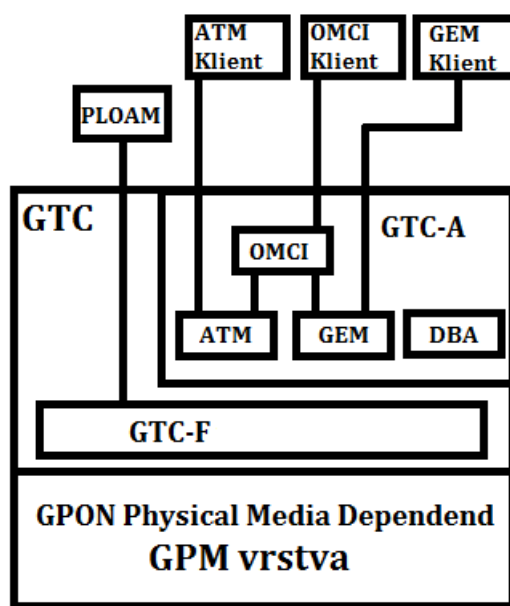
Varianta PON	GPON
standard	ITU-T G.984
přenos. rychlost – sestupný směr	1,244 nebo 2,488 Gbit/s
přenos. rychlost – vzestupný směr	1,244 nebo 2,488 Gbit/s
vlnová délka – sestupný směr	1480-1500 nm
vlnová délka – vzestupný směr	1260-1360 nm
protokol na druhé vrstvě	ATM, GEM
max. počet připojených uživatelů	64
fyzický dosah sítě	20 km

Tab. 1.2: Souhrn základních informací o standardu GPON.

1.2.1 Vrstvový model GPON

Pro GPON byl definován nový vrstvový model. Je podobný jako u ATM, ale s drobnými změnami. Především byl doplněn o nový protokol GEM a systému služebních zpráv a řízení OMCI (ONU Management and Control Interface). Tento nový systém služebních zpráv OMCI slouží především pro dohled a řízení operací vyšších vrstev. Tyto zprávy se nacházejí v samotných datových jednotkách rámců GEM a protokol zodpovídá zejména za správné doručení přenášených uživatelských dat [9]. Řízení a správu fyzické vrstvy mají na starosti stejně jako u ATM PLOAM buňky. Vrstvový

model GPON je zobrazen na obrázku 1.3. Vrstva GTC (GPON Transmission Convergence Layer) je rozdělena na dvě podvrstvy. Podvrstvu GTC-F (GTC Framing sublayer) a podvrstvu GTC-A (GTC Adaptation sublayer). Spodní podvrstva GTC-F řídí především skládání jednotlivých datových jednotek a rovněž sestavuje záhlaví celého přenosového rámce T-CONT. Horní podvrstva GTC-A provádí analýzu, adaptaci a rozdělení vlastních přenášených GEM rámců a řídí dynamické přidělování přenosové kapacity ve vzestupném směru - DBA (Dynamic Bandwidth Assignment) [9].



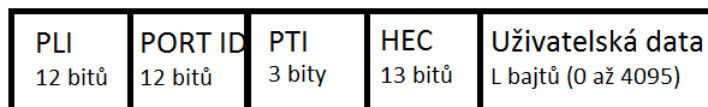
Obr. 1.3: Vrstvový model GPON.

1.3 Struktura GEM rámce

Struktura samotného GEM rámce pro přenos uživatelských dat je zobrazena na obrázku 1.4. Velikost záhlaví GEM rámce je 5 bajtů, stejnou velikost má i ATM hlavička. Velikost určená pro uživatelská data je však v tomto případě variabilní a to od velikosti 0 bajtů až 4095 bajtů, v případě potřeby přenést více uživatelských dat najednou, je třeba je rozdělit do více GEM rámců. Velikost uživatelských dat je uložena v položce záhlaví - PLI.

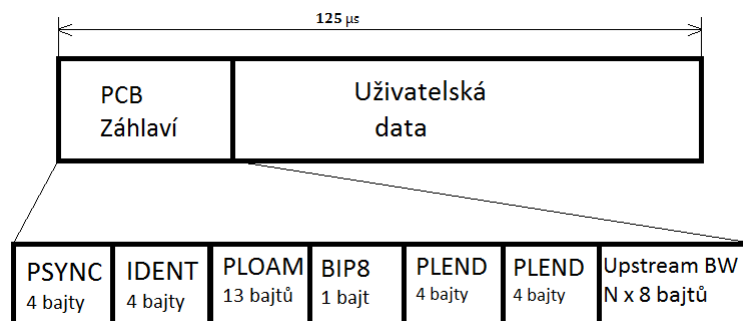
Struktura přenosového rámce ve směru k uživateli

Jak už bylo řečeno výše, mají přenosové rámce vždy pevnou délku 125 μ s. To pro každou přenosovou rychlost odpovídá jinému počtu bajtů. Pro rychlost 1,244 Gbit/s



Obr. 1.4: Struktura GEM rámce.

obsahuje přenosový rámec 19440 bajtů a pro rychlost 2,488 Gbit/s je tato velikost dvojnásobná, tedy 38880 bajtů. Délka záhlaví PCB (Physical Control Block) není pevně daná a závisí na počtu koncových účastnických stanic ONT, ale velikost je shodná pro obě přenosové rychlosti. Jednotlivé prvky záhlaví s pevnou velikostí, dávají v součtu 30 bajtů, k těmto 30 bajtům se přičte $N \times 8$ bajtů, kde N označuje počet koncových účastnických stanic ONT. Právě část záhlaví s proměnnou délkou, nazývaná upstream BW (BandWidth), informuje koncové jednotky o tom, kdy bude která stanice vysílat. Struktura přenosového rámce pro směr k uživateli je zobrazena na obrázku 1.5 společně se strukturou záhlaví přenosového rámce PCB. Identifikační pole (Identification) má velikost 4 bajty z nichž 30 bitů je rezervováno jako čítač odchozích GEM rámců. Pole PLEND (Payload Length field) v sobě nese zase informaci o délce uživatelských dat přenášenou pomocí ATM buněk, aby byl zajištěn jeho bezchybný příjem, je odeslán dvakrát. Uživatelská data v přenosových rámcích mohou být implementována pomocí ATM buněk nebo pomocí GEM rámců.



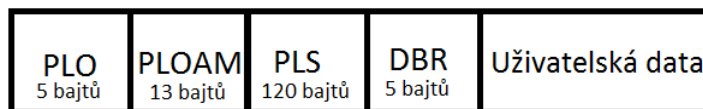
Obr. 1.5: Přenosový rámec GPON ve směru k uživateli.

Užitečná přenosová rychlost v tomto případě není jednoznačně stanovitelná, jako při použití standardu BPON. Závisí na použité přenosové rychlosti, kdy je v přenosovém rámci pokaždé jiný počet bajtů. Dále je závislá na počtu koncových jednotek, kdy s narůstajícím počtem koncových jednotek roste i velikost záhlaví přenosového rámce PCB. Dalším faktorem je, zda jsou pro přenos použity GEM rámce nebo ATM buňky. S každou ATM buňkou, tak i s každým GEM rámcem, klesá místo určené pro uživatelská data o 5 bajtů, které tvoří hlavička ATM buňky nebo GEM rámce. Z tohoto hlediska je pro přenos větších dat výhodnější použití GEM rámců

než ATM buněk. Jejichž velikost určená pro uživatelská data je variabilní od 0 bajtů po 4095 bajtů.

Struktura přenosového rámce ve směru od uživatele

Stejně jako ve směru k uživateli má přenosový rámec délku 125 μ s. Koncová jednotka odešle vždy volitelně jedno až čtyři části záhlaví podle požadavku jednotky OLT a dále pokud má možnost i uživatelská data [9]. Záhlaví tedy může tvořit část PLO (Physical Layer Overhead), která zajišťuje rámcovou synchronizaci, bitovou paritu, identifikaci koncových stanic ONT a přenáší informaci o velikosti čekajících dat. Dále je tu část PLS (Power Levelling Sequence), která slouží pro vysílání testovacích posloupností a na základě nich je pak nastavována vysílací úroveň. Část záhlaví označená DBR (Dynamic Bandwidth Report) zadává požadavek na vyhrazení vysílací kapacity v přenosovém rámci. Čtvrtou částí záhlaví je část označená PLOAM, která přenáší služební zprávy. Pak čeká koncová jednotka na povolení od jednotky OLT, vysílat uživatelská data. Uživatelská data jsou odesílána po odeslání části záhlaví DBR a to stejně jako ve směru k uživateli v podobě ATM buněk nebo pomocí rámců protokolu GEM s tím rozdílem, že nelze jako v případě vysílání ve směru k uživateli kombinovat tyto dvě struktury. Struktura přenosového rámce ve směru od uživatele je zobrazena na obrázku 1.6.



Obr. 1.6: Přenosový rámec GPON ve směru od uživatele.

1.4 Standard XGPON

Podobně jako institut IEEE vytvořil standard 10GEPON, unie ITU-T vytvořila v roce 2010 standard XG-PON, s přenosovou rychlostí na fyzické vrstvě 10 Gbit/s. Tento standard byl vyvíjen pod označením ITU-T G.987. Snaha ITU-T směřovala k navýšení přenosové rychlosti a zpětné kompatibilitě s předchozí verzí protokolu GPON. Oba standardy GPON i XG-PON jsou tedy schopny fungovat vzájemně na jedné síti, případně je možný postupný přechod na novější standard. S novou verzí byl navržen také nový zapouzdřovací protokol XGEM, který vychází s předchozího protokolu GEM, ale přináší pár novinek. Nejvýraznější změnou je zvětšení adresního pole, to umožní adresaci většího počtu koncových jednotek ONT, teoreticky až 256 [8].

Přenosová rychlost standardu XG-PON byla stanovena nesymetricky, pro směr sestupný 9,95328 Gbit/s a pro směr vzestupný 2,48832 Gbit/s. Přenosová rychlost pro vzestupný směr je shodná s přenosovou rychlostí u standardu GPON a v novém standardu nebyla navýšena, tudíž nesymetrická varianta přenosových rychlostí je jedinou možnou. V rámci koexistence s předchozí verzí byly nově stanovené vlnové délky pro přenos. Na rozdíl od 10GEPON, kde se ve směru od uživatele vlnová délka schoduje se starší verzí GPON a musí se dělit o přenosový kanál, u XGPON byl upraven standard GPON a vlnová délka ve směru od uživatele byla rozdělena. Pro XGPON je to rozmezí vlnových délek 1260 nm - 1280 nm a pro starší standard GPON nově 1290 nm - 1330 nm, střední hodnota vlnové délky standardu GPON však zůstala stejná a to 1310 nm. Pro směr sestupný byla pro standard XGPON stanovena vlnová délka 1575 nm - 1580 nm a jako u jiných verzí přenos TV signálu zůstal na vlnových délkách 1550 nm - 1560 nm. Souhrn informací o standardu XGPON je vypsán v tabulce 1.3

varianta PON	XGPON
standard	ITU-T G.987
přenos. rychlost - sestupný směr	9,95328 Gbit/s
přenos. rychlost - vzestupný směr	2,48832 Gbit/s
vlnová délka - sestupný směr	1575 - 1580 nm
vlnová délka - vzestupný směr	1260 - 1280 nm
protokol na druhé vrstvě	XGEM
max. počet připojených uživatelů	156
fyzický dosah sítě	20

Tab. 1.3: Souhrn základních informací o standardu XGPON

Institut ITU-T s vydáním nového standardu XGPON naznačil také koncepci budoucích standardů pro pasivní optické sítě. Ta se ubírá dvěma směry, prvním z nich je NGA1 (Next Generation Access 1), do této skupiny patří i standard XGPON. Snaha NGA1 je udržet kompatibilitu se staršími standardy vydanými institutem ITU-T. Druhý směr je označen jako NGA2, zde se již počítá s plným využitím vlnového multiplexu, jako je CWDM a DWDM, případně kombinace časového dělení TDM a vlnového dělení xWDM. Pro NGA2 je uvažováno sdílených přenosových rychlostí až 40 Gbit/s, například s využitím 4 vlnových délek při přenosové rychlosti 10 Gbit/s, případně 40 vlnových délek při rychlosti 1 Gbit/s. U NGA2 se však nepočítá se zpětnou kompatibilitou s předchozími verzemi PON sítí a jejich nasazení by znamenalo zcela novou koncepci[8]. NGA2 je však do budoucna perspektivnější řešení a dá se předpokládat jeho nasazení v přístupových sítích.

1.5 Standard EPON

Standard EPON (Ethernet Passive Optical Network) je založen na přenosu klasických Ethernetových rámců o pevné délce 2 ms, podobně jako u standardů APON/BPON to byly ATM buňky a ve standardu GPON potom GEM rámce. Standard EPON je někdy také označován jako GEPON, G označuje Gigabitovou přenosovou rychlost na fyzické vrstvě. Byl navržen společností IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) v roce 2004 pod označením IEEE 802.3ah. Cílem bylo zavedení standardu Ethernet až k uživateli a tím zjednodušení navazování lokálních sítí [4]. Byly navrženy dvě útlumové třídy tohoto standardu, jedna pod označením 1000BASE-PX10 a druhá 1000BASE-PX20, většinou označované jako EPON typ 1 a EPON typ 2. Tyto 2 typy se liší pouze v maximálním fyzickém dosahu sítě a v maximálním počtu koncových účastníků. Kdy první typ dosahuje maximální fyzické vzdálenosti 10 km a rozbočení k 16 koncovým účastníkům a druhý typ maximální fyzické vzdálenosti 20 km a rozbočení k 32 koncovým účastníkům. Ostatní parametry jsou shodné, proto první typ nebude dále popisován.

Přenosová rychlost byla stanovena na 1,25 Gbit/s na fyzické vrstvě a to ve směru k uživateli tak i ve směru od uživatele. Provoz v obou směrech je možné opět řešit použitím dvou separátních kabelů, případně použitím odlišných vlnových délek pro každý směr. Pro směr k uživateli bylo stanoveno rozmezí vlnových délek od 1480 nm - 1500 nm a pro směr opačný rozmezí od 1260 nm - 1360 nm.

Ve směru k uživateli jsou vysílána jednotkou OLT kontinuálně časové multirámce, ve kterých jsou díky použití časového multiplexu TDM (Time Division Multiplex) zařazeny příspěvky pro jednotlivé koncové jednotky. Tyto multirámce se díky pasivním rozbočovačům dostávají do všech koncových jednotek ONT, kde je vybrána jen část určená danému koncovému uživateli. Ve směru od uživatele je implementován systém vyhrazených vysílacích intervalů pro zajištění bezkolizního provozu. Jednotlivé datové jednotky ve výsledném multirámcu jsou navíc odděleny ochranným intervalem [10].

EPON je sice navržen pro mnohabodovou komunikaci - P2MP (Point to Multi-Point) po sdíleném vláknu, ale je možné emulovat i komunikaci bod-bod. Případně je možná i kombinace obou variant. V případě použití emulace komunikace bod-bod je nutné, aby jednotka OLT měla N nezávislých MAC (Media Access Control) rozhraní, kde N je rozuměno počet koncových stanic a každá stanice je potom označena vlastním LLID (Logical Link ID) přenášěným v preambuli Ethernetového rámce. Takto vysílaný rámec dorazí pomocí broadcastového vysílání ke všem koncovým jednotkám, ale přijme ho jen ta, které je určen. Ostatní koncové jednotky rámec zahodí. V případě komunikace P2MP je v OLT obsaženo pouze jedno MAC rozhraní sdílené pro všechny koncové jednotky. A LLID má hodnotu určenou pro broadcas-

tový přenos. Při kombinaci obou druhů komunikace je logické, že koncová jednotka bude obsahovat $N+1$ MAC rozhraní, kdy N opět znamená počet koncových jednotek a jedno rozhraní navíc je sdílené pro všechny koncové jednotky. Souhrn informací o standardu EPON je v tabulce 1.4.

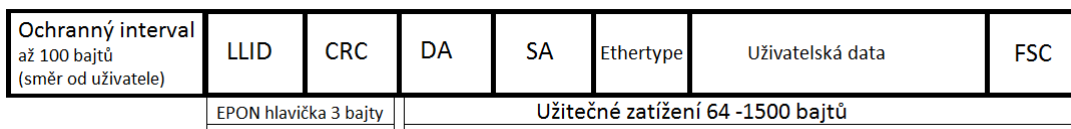
Varianta PON	EPON
standard	IEEE 802.3ah
přenos. rychlost – sestupný směr	1,25 Gbit/s)
přenos. rychlost – vzestupný směr	1,25 Gbit/s
vlnová délka – sestupný směr	1490 ± 10 nm
vlnová délka – vzestupný směr	1310 ± 50 nm
protokol na druhé vrstvě	Ethernet
max. počet připojených uživatelů	32
fyzický dosah sítě	20 km

Tab. 1.4: Souhrn základních informací o standardu EPON.

1.5.1 Skladba Ethernetového rámce

Protokol Ethernet byl vyvinut institutem IEEE pod označením IEEE 802.3. V současné době je nejpoužívanějším protokolem používaným v LAN (Local Area Network) sítích. Je třeba si uvědomit, že protokol Ethernet je od standardu EPON odlišný. Pro přenos se využívá Ethernetových rámců, ty ale mají určité rozdíly oproti Ethernetovým rámcům používaným v klasickém Ethernetu.

Už z důvodu rozdílné architektury pasivní přístupové optické sítě není možné použít metodu pro přístup ke sdílenému médiu, která je používána klasickým Ethernetem, CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Koncové jednotky ONT nejsou schopny se navzájem slyšet a tudíž ani detekovat případnou kolizi. Rozdíly jsou i v samotné hlavičce rámce. V EPON hlavičce se pro adresování jednotlivých ONT používá LLID v opačném směru je pak v LLID uložena informace o odesílajícím ONT, v klasickém Ethernetovém rámci tuto funkci zaujímá fyzická adresa MAC (Media Access Control). Část FSC slouží jako zabezpečovací pole rámce. Navíc je také implementována do hlavičky cyklická redundantní kontrola CRC, která se používá pro ověření bezchybného příjmu hlavičky rámce. V GPON tuto část hlavičky zaujímá část HEC (Header Error Correction) [3]. Dále část DA (Destination Address), kde je uložena cílová MAC adresa a část SA (Source Address), kde je uložena MAC adresa zdroje. Skladba jednoho EPON rámce je zobrazena na obrázku 1.7.



Obr. 1.7: Přenosový rámec EPON.

1.6 Standard 10GEPON

Standard 10GEPON (10 Gigabit EPON) není prvním nástupcem standardu EPON, v roce 2007 byla zavedena varianta Turbo EPON o přenosové rychlosti až 2,5 Gbit/s, ale nebyla standardizována a rozšířila se jen na malém území Číny. Standard 10GEPON se objevil v roce 2009 pod označením IEEE 802.3av, snahou byla plná zpětná kompatibilita z předchozího standardu EPON, což se vývojářům podařilo a z toho důvodu mohl být standard 10GEPON zaváděn bez větších nákladů i do stávajících pasivních přístupových sítí.

Jak již bylo naznačeno v předchozím odstavci, přenosové rychlosti standardu 10GEPON je možné používat ve dvou variantách a to buď symetrické, kdy je ve směru k uživateli i ve směru od uživatele použita rychlost 10,3125 Gbit/s, nebo nesymetrickou službu kdy ve směru k uživateli je použita rychlost 10,3125 Gbit/s a ve zpětném směru rychlost ze standardu EPON, tedy 1,25 Gbit/s. V jedné přístupové síti je možné kombinovat pro jednotlivé koncové jednotky ONT symetrickou i nesymetrickou službu. Nesymetrická služba byla zavedena hlavně z důvodu nižších nákladů na koncové účastnické jednotky ONT, kdy je možné použít levnější optické zdroje v těchto jednotkách. Nesymetrická služba je také plně dostačující pro většinu dnešních uživatelů. Nároky jsou kladeny ve větší míře na šířku pásma ve směru k uživateli, obzvláště pro služby jako je IPTV (Internet Protocol television), VoD (Video on Demand), atp.

Vysílání v obou směrech je většinou řešeno, jako u předchozích standardů, pomocí vlnového dělení. Pro směr k uživateli je využíváno rozmezí vlnových délek 1575 nm - 1580 nm a ve směru od uživatele je to pro symetrickou službu 1260 nm - 1280 nm a při použití nesymetrické služby 1260 nm - 1360 nm.

V tomto standardu je také povinné použití opravného kódování FEC (Forward Error Correction) na principu Reed-Solomonova kódování. Díky němu je značně snížena užitečná přenosová rychlost, bez započtení obsahu záhlaví a služebních informací na přibližně 8,754 Gbit/s [11].

Co se týče rozbočovacího poměru a fyzického dosahu sítě definuje standard 10GEPON typické hodnoty pro EPON standard, tj. fyzický dosah sítě 20km a rozbočovací poměr 32 účastníků. Ve skutečnosti jsou tyto hodnoty značně variabilní a snížením jedné hodnoty můžeme navýšit hodnotu druhou a naopak. Souhrn informací o stan-

standardu 10GEPON zobrazuje tabulka 1.5.

Variantu PON	10GEPON
standard	IEEE 802.3av
přenos. rychlost – sestupný směr	10,3125 Gbit/s
přenos. rychlost – vzestupný směr	10,3125 nebo 1,25 Gbit/s
vlnová délka – sestupný směr	1575-1580 nm
vlnová délka – vzestupný směr	1260-1280 nebo 1260 - 1360 nm
protokol na druhé vrstvě	Ethernet
max. počet připojených uživatelů	32
fyzický dosah sítě	20 km

Tab. 1.5: Souhrn základních informací o standardu 10GEPON.

1.7 Přidělování přenosové kapacity

1.7.1 Procedura DBA a SBA

Procedura DBA (Dynamic Bandwidth Assignment) má za úkol u standardů GPON a APON/BPON přidělování přístupu ke sdílené přenosové kapacitě - MAC (Media Access Control). To zajišťuje, že ve směru od uživatele nedojde při vysílání ke kolizi dat vysílaných jednotlivými jednotkami.

Ve směru k uživateli vysílá jednotka OLT v přenosovém rámci informaci o přidělení časových intervalů jednotlivým koncovým jednotkám ONT. Jak název procedury napovídá, jedná se o dynamické přidělování časových intervalů. To znamená, že jednotka OLT dokáže reagovat na požadavky jednotlivých koncových jednotek. Koncové jednotky vysílají v rámci služebních buněk PLOAM zase informaci o zaplnění své vyrovnávací paměti, to znamená velikosti dat připravených k odeslání. Pro DBA existují čtyři různé typy přidělování šířky pásma, v rozmezí od best-effort, s nejnižší prioritou, až po pevně danou šířku pásma, typ s nejvyšší prioritou.

Naproti tomu procedura SDA (The Static Allocation) má na začátku pevně danou šířku pásma pro každou aplikaci a ani v případě, že jedna služba je nevyužívána, nemění její přidělenou šířku pásma.

Pro standard GPON jsou definovány dva typy DBA a to metoda označovaná SR-DBA (Status Reporting DBA) a metoda NSR-DBA (Non Status Reporting DBA) [9]. Pro SR-DBA je přidělování přístupu řízeno pomocí zpráv vysílaných od koncových jednotek ONT. Informují jednotku OLT o stavu zaplnění zásobníku čekajícími daty a na základě toho OLT přiřazuje jednotkám časové okamžiky. V druhém

typu NSR-DBA přiděluje OLT přenosovou kapacitu koncovým jednotkám automaticky na základě předchozích znalostí o vysílání koncových jednotek. V tomto případě jednotlivé koncové jednotky nevysílají zprávy o zaplnění svých vyrovnávacích pamětí.

1.7.2 Protokol MPCP

Ethernet je koncipován do sítí MP2MP (MultiPoint to MultiPoint), to znamená, že vysílání probíhá od všech stanic zase ke všem stanicím kromě výchozí. V pasivních optických přístupových sítích je však vysílání P2MP, z toho důvodu byl do standardu EPON zaveden pro potřeby řízení, správy, služební komunikace a dynamického přidělování přenosových kapacit v multirámci ve směru od uživatele protokol MPCP (Multi-Point Control Protocol). Pro přidělování přenosové kapacity koncovým jednotkám je použito podobného systému jako u metody DBA v síti GPON.

OLT vyšle na všechny koncové stanice ONT hned po sobě zprávy GATE s definovanými časovými okamžiky a čeká na jejich odpovědi REPORT, ve které je obsažena zpráva o velikosti uživatelských dat čekajících na odeslání. Každá koncová jednotka potom odesílá zprávu REPORT a spolu s ní i část uživatelských dat. Doba, po kterou jednotlivé koncové jednotky mohou odesílat svá data, musí být pevně definovaná, aby nedocházelo ke kolizím. Po skončení vysílání jedné koncové jednotky je navíc zařazen ochranný interval bez vysílání. Jednotka OLT může, na základě údajů o množství dat čekajících na odeslání u jednotlivých koncových jednotek, dynamicky přidělovat dobu, po kterou bude určitá koncová jednotka vysílat.

2 PŘENOS TELEVIZNÍHO SIGNÁLU V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH

V rámci PON sítí máme dvě možnosti jak přenášet televizní signál, jednou z nich je přenášet digitalizovaný televizní signál pomocí tzv. překryvné PON. Druhou možností je přenášení videa prostřednictvím paketové sítě, tj. IPTV.

2.1 CATV

Pro přenos televizního signálu překryvnou PON je nutné zajistit příjem a sloučení kanálů do jednoho signálu. Pomocí EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovače je nutné signál dostatečně zesílit, aby měl při příjmu v ONT dostatečnou úroveň. Laserový vysílač potom převede tento signál na optický, který je přenášen po optickém vlákne společně s datovým provozem pomocí vlnového multiplexu. To je většinou řešeno v OLT. Pro přenos analogového televizního signálu byla zvolena vlnová délka 1550 nm. Tato vlnová délka byla stanovena organizací ITU-T z důvodu nízkého útlumu optického vlákna na této vlnové délce. V koncových jednotkách ONT je signál přijat a doveden už běžným koaxiálním kabelem k televiznímu přijímači. Důležité je pouze aby signál přicházející na koncové jednotky měl dostatečnou úroveň aby bylo možné jej správně zpracovat.

2.2 IPTV

Při přenosu IPTV jsou jednotlivé televizní kanály digitalizovány a komprimovány buď MPEG2 nebo MPEG4. Následně jsou vkládány do IP datagramů a přenášeny jako běžná data ke koncovým jednotkám. Z koncové jednotky je většinou nutné připojit před televizní přijímač ještě set-top box vybavený IP rozhraním, který převede data na analogový signál. Celá režie vysílání IPTV probíhá v tzv. head-endu, tam poskytovatel připravuje programy pro šíření v síti. Z důvodu velké šířky pásma potřebné pro přenos IPTV je v dnešní době možné přenášet k jednomu účastníkovi pouze jeden televizní program. Každý z programů se chová jako multicastová skupina a uživatel se přihlásí vždy k jedné multicastové skupině programu, který chce přijímat. Připojování účastníků k jednotlivým multicastovým skupinám probíhá většinou až v OLT. Většinou je podporován i unicast, využívá se pro služby na vyžádání. Tímto způsobem jsou poskytovány například služby VoD (Video on Demand), typickým příkladem je videotéka, kdy si uživatel vybere film, který je uložen na serveru. S takovýmto obsahem pak uživatel může pracovat jako DVD ve vlastním přehrávači.

2.3 Srovnání možností přenosu TV signálu

Nespornou předností IPTV jsou možnosti, které jsou s ním spojené. To jest už zmíněné video na požádání, případně i záznam vybraného televizního signálu na video-server, prohlížení webových stránek přímo v TV a mnohé další. Naopak nevýhodou je přenos pouze jednoho TV kanálu ke koncovému uživateli. Většina domácností má v dnešní době více televizorů, které by v případě příjmu IPTV nebyly využity. Tohle omezení nebude nejspíš trvalým problémem, při použití dnešních standardů je už přenosová kapacita dostatečná pro souběžný přenos více kanálů. Bylo by to samozřejmě na úkor jiných aplikací. Další nevýhodou IPTV je vyšší pořizovací cena aktivních prvků sítě, jak na straně koncového účastníka, tak na straně poskytovatele.

Naproti tomu CATV nedokáže uživateli poskytnout interaktivní služby jako v případě IPTV. Je to ale kompenzováno cenou aktivních prvků sítě. Důležitým faktem je také to, že při přenosu pomocí překryvné PON televizní signál neubírá z přenosové kapacity přístupové sítě. V praxi poskytovatelé kabelových televizí, v dnešní době, využívají stále spíše možnosti přenosu analogového signálu a to i v případě, že přijímaný signál je digitální. Takový signál před odesláním z OLT převedou na analogový.

3 VLNOVÉ DĚLENÍ WDM

Technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) využívá pro přenos více vlnových délek. Základní standardy definující vlnové dělení jsou popsány pod záštitou institutu ITU-T pod označením G.694.1 a G.692. Podobný princip byl využíván již pro oddělení směru vysílání u standardů využívajících časový multiplex TDM. Nové technologie ale dovolují použití většího počtu vlnových délek jak pro směr sestupný tak vzestupný a tím značně navýšit přenosovou kapacitu. Ve své podstatě se jedná o frekvenční oddělení jednotlivých přenosových kanálů, takže ve vláknech nedojde ke kolizi ani při vysílání více vlnových délek najednou. Tímto nám vlnové dělení WDM nabízí výhody spojení Point to Point při použití jediného vlákna. Každý koncový účastník může mít v PON síti své 2 kanály pro komunikaci, jeden ve vzestupném směru a druhý ve směru sestupném. Nemusí se časově oddělovat vysílání koncových jednotek ONT při použití směrové odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating) se v sestupném směru oddělí jednotlivé kanály a dále už se k jednotce ONT šíří jen vlnová délka určená pro daného koncového účastníka. Díky tomu je značně zvýšena bezpečnost oproti použití rozbočovače, ten signál pouze rozdělil a odeslal ke všem koncovým jednotkám a ty, na základě značky v hlavičce rámce přijaly, případně zahodily příchozí rámec. S použitím AWG se ke koncovým jednotkám ONT dostane pouze vlnová délka pro ně určená.

Podle rozestupu jednotlivých vlnových délek se vlnový multiplex dělí na WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing) široký vlnový multiplex, CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) hrubý vlnový multiplex, DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) hustý vlnový multiplex a UDWDM (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing) ultra hustý vlnový multiplex. Jednotlivé typy vlnových multiplexů budou podrobněji probrány dále. UDWDM využívá rozestup kanálů menší než 0,4 nm experimentálně je testován i rastr z odstupem kanálů pouhých 0,1 nm, což v oblasti C a L pásma odpovídá přibližně 12,5 GHz. Technika v dnešní době nedovoluje masové využití tohoto dělení v přístupových sítích, především z finančních důvodů.

Široký vlnový multiplex WWDM je už delší dobu využíván. Rozestup kanálů je v tomto případě větší než 20 nm. V dnešní době je díky své cenové dostupnosti využíván pro Gigabitový a 10 Gigabitový Ethernet v LAN sítích. U vícevidových vláken jsou použity 4 vlnové délky v oblasti okolo 850 nm a jednovidových vláken potom 4 vlnové délky okolo 1310 nm [4].

U hustého vlnového multiplexu DWDM je rozestup mezi kanály menší než 1 nm. V dnešní době je to nejdokonalejší technologie využívaná v pasivních přístupových optických sítích. Po jednom vlákne je tak možné přenést až 96 kanálů. Pro přenos DWDM signálu je nejčastěji používáno C-pásmo, v oblasti vlnových délek 1530 nm -

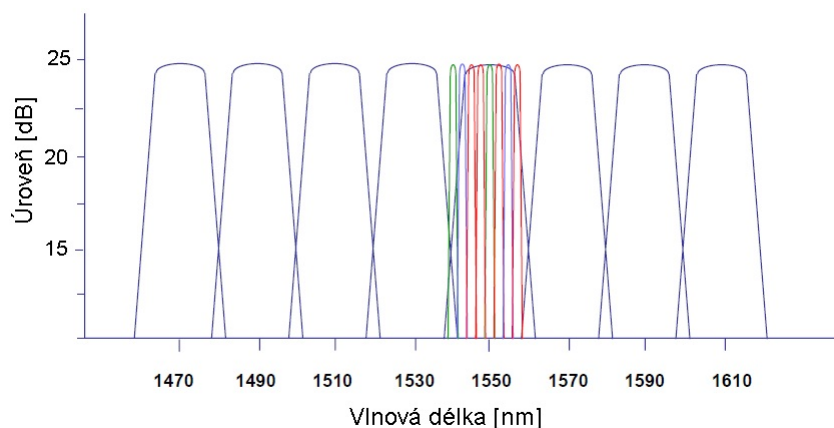
1565 nm, nebo L-pásmo, v oblasti vlnových délek 1565 nm - 1625 nm. Pro využití této technologie v praxi je třeba DFB (Disturbed FeedBack Laser) laserů s extrémně tenkou spektrální čarou, vysoce selektivní filtry a při větších vzdálenostech také EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovače. Tato zařízení jsou kmitočtově a teplotně citlivá a v dnešní době také značně nákladná [2].

Hrubý vlnový multiplex CWDM vznikl z hustého vlnového multiplexu DWDM jako jeho levnější varianta. Je využíváno odstupů mezi kanály 20 nm. Tabulka 3.1 s jednotlivými kanály technologie CWDM, kde je ukázáno rozdělení kanálů mezi jednotlivé pásma a označení jednotlivých kanálů. Z důvodu lepší dostupnosti technického vybavení pro přenos, je v přístupových sítích nejčastěji využíváno C-pásmo.

Označení kód kanálu CWDM	Nominální vlnová délka [nm]	Rozdělení spektra jednovidového vlákna 9/125 μ m
27	1270	O - Original 1260 - 1360 nm Původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm
29	1290	
31	1310	
33	1330	
35	1350	
37	1370	E - Extended 1360 - 1460 nm Nové pásmo, využitelné pouze s novými typy vláken typu "Low Water Peak" podle standardu ITU-T G.652.C
39	1390	
41	1410	
43	1430	
45	1450	
47	1470	S - Short 1460 - 1530 nm Pásmo kratších vlnových délek, které je využíváno pro nové typy přenosů, zvláště CWDM
49	1490	
51	1510	
53	1530	
55	1550	C - Conventional 1530- 1565 nm
57	1570	L -Long 1565 - 1625 nm Pásmo dlouhých vlnových délek, využíváno pro novější typy přenosů
59	1590	
61	1610	

Tab. 3.1: Vlnové délky CWDM podle standardu ITU-T G.694.2 [18].

Odstup jednotlivých kanálů byl definován tak, aby bylo možné využít pro vysílání laserových diod bez nároku na chlazení a také, aby byly kompatibilní s běžnými vlnovými délkami, tj. 1310 nm a 1550 nm. Tolerance od nominální střední hodnoty byla standardizována na ± 6 nm - 7 nm, v praxi je tak využívána tolerance v rozsahu 6,5 nm jak pro CWDM filtry tak pro použité laserové diody [18]. Rozložení kanálů technologie CWDM v pásmech S, C a L, s odstupem jednotlivých kanálů 20 nm je zobrazeno na obrázku 3.1. Můžeme také vidět rozložení kanálů technologie DWDM při použití rastru 200 GHz, což v tomto přenosovém pásmu odpovídá přibližně 0,1 nm.



Obr. 3.1: Kanály s odstupem vlnových délek 20 nm v pásmech S, C a L.

3.1 WDM-PON sítě

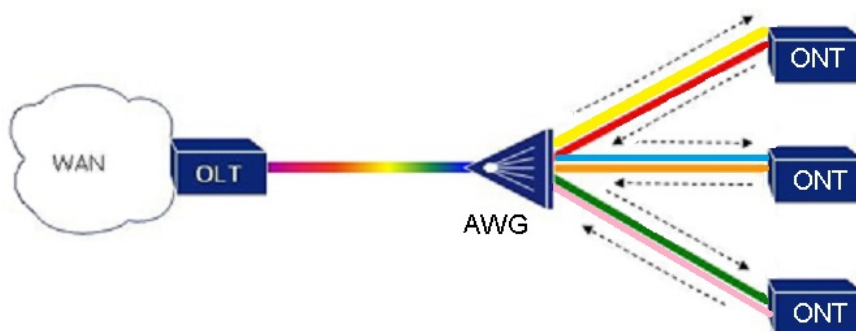
Jak už naznačila koncepce NGA2, popsána u standardu XGPON, předpokládá se do budoucna zařazení vlnového dělení do oblasti přístupových sítí. Vzhledem k tomu, že technologické možnosti u časového dělení TDM už téměř nedovolují další navýšení přenosových rychlostí, je nástup vlnových multiplexů do těchto sítí logickým krokem. Obzvláště potom v kombinaci WDM-TDM sítí, kdy je kombinován přenos více vlnových délek na základě vlnového dělení v kombinaci s časovým dělením pro každý kanál. Z počátku se budou z důvodu nižší ceny upřednostňovat systémy CWDM. Ale na základě dnešního trendu stále se zvyšujících nároků koncových uživatelů a snižování cen technologií, se dá předpokládat kombinování a následný přesun na technologii DWDM[17].

3.1.1 Typy možných realizací WDM-PON

První možností je použití rozbočovače pro odeslání WDM signálu na všechny výstupní porty. Ve směru k uživateli ke koncové jednotce ONT přicházejí všechny vlnové délky. V koncové jednotce je umístěn pevně nastavený filtr, který vydělí vlnovou délku určenou dané koncové jednotce, případně ještě vlnovou délku určenou pro broadcastový přenos všem koncovým jednotkám. Ve směru opačném má zase každá jednotka určenou svoji vlnovou délku na které vysílá. Nespornou výhodou tohoto řešení oproti časovému dělení TDM je, že každá jednotka komunikuje v obou směrech nezávisle na ostatních jednotkách. Oproti ostatním možnostem návrhu sítí WDM-PON má několik zásadních nevýhod. Je třeba řešit otázku bezpečnosti, stejně jako u časového multiplexu TDM, jsou schopny všechny koncové jednotky naslouchat

veškerému provozu v sestupném směru. Z toho důvodu je třeba zabránit odposlechu různými šifrovacími metodami. Dvě jednotky nemůžou komunikovat na stejné vlnové délce, to značně omezuje využití potenciálu přenosové kapacity.

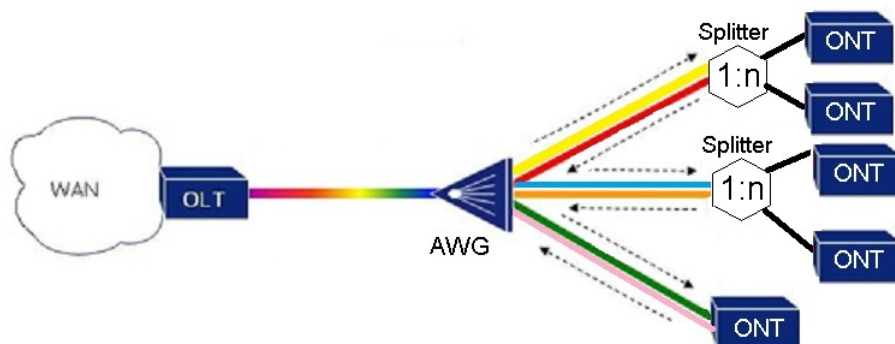
Druhou variantou je použití směrové odbočnice AWG namísto rozbočovačů. Jednotlivé vlnové délky jsou rozděleny již před příchodem signálu ke koncovým jednotkám ONT a ke každé z koncových jednotek dojde pouze její vlastní vlnová délka. Ve směru vzestupném je princip stejný jako u předchozí varianty. Výhody vyplývající z použití AWG odbočnice namísto rozbočovače jsou už zmíněné bezpečnostní důvody. Ke koncovým jednotkám nedorazí všechny přenášené vlnové délky, ale vlnová délka pouze pro ně určená, dále se tím eliminuje použití optických filtrů v koncových jednotkách a velkou výhodou je malý útlum AWG odbočnice, který navíc nevzrůstá s přibývajícím počtem výstupních portů. Hodnota útlumu AWG odbočnice se pohybuje okolo 5 dB. Tuto variantu naznačuje obrázek 3.2. Nástavbou této varianty může být použití FP (Fabry - Perot) laseru v koncových jednotkách ONT. FP laser je opticky zavěšen na stimulační vlnové délce přicházející od AWG [6]. Tento stimulační paprsek je na filtru oddělen od signálu ve směru vzestupném a přichází na FP laser. FP laser má za normálních okolností široké spektrum, avšak po zavěšení na příchozí vlnovou délku zvýrazní pouze danou vlnovou délku a ostatní jsou potlačeny. Tím získá spektrum s úzkou spektrální čarou a je výhodné jej používat v ONT jednotkách určených pro přístupové sítě s využitím vlnového dělení WDM.



Obr. 3.2: WDM-PON s využitím směrové odbočnice AWG.

Třetí varianta využívá již zmíněnou možnost kombinace WDM dělení a časového dělení TDM. Signál je nejprve rozdělen AWG odbočnicí na jednotlivé kanály, které jsou dále děleny rozbočovačem jako u klasické PON sítě. Každá skupina koncových jednotek vystupující pod jedním rozbočovačem má tak k dispozici jeden kanál pro

směr sestupný a jeden kanál pro směr vzestupný. Pro oddělení komunikace jednotlivých koncových jednotek je stejně jako u klasických PON sítí využíváno časové dělení TDM. Tato varianta tak nejlépe dokáže využít přenosové pásmo, které síť poskytuje. Obrázek naznačující tento způsob návrhu sítí je na obrázku 3.3



Obr. 3.3: WDM-TDM-PON s využitím směrové odbočnice AWG v kombinaci s pasivním rozbočovačem.

3.2 Pasivní prvky používané v PON a WDM-PON

3.2.1 Muldexy

Muldex je souhrnné označení multiplexoru a demultiplexoru. Jejich hlavní funkcí je sdružování více světelných signálů do jednoho vlákna, případně jejich zpětné vydělení. Pro vydělení jednotlivých délek se používají selektivní filtry. Většinou bývají tato zařízení uzpůsobena pro duplexní provoz. Aby se zabránilo přeslechům mezi vysílačem a přijímačem je nutné použití vazebních členů [4].

Selektivní interferenční filtry

V závislosti na vlnové délce způsobují tyto filtry buď odraz světelné vlny, to v případě že nenáleží danému přijímači, případně jím světelná vlna projde až k přijímači.

Vložný útlum muldexů tvořený těmito filtry, roste úměrně s počtem přenášených vlnových délek, proto se používají v systémech s menším počtem kanálů [4].

Disperzní filtry

V těchto filtrech je pro rozklad světla využíváno optických mřížek případně hranolu. Při rozkladu hranolem dochází k nežádoucímu dvojnásobnému lomu na hraničních plochách. Vhodnější je použití optických mřížek. Vložný útlum muldexu se zvyšujícím se počtem kanálů při použití optické mřížky mění jen málo [4].

ROADM

ROADM (Reconfigurable optical add-drop multiplexer) tato zařízení nám umožňují selektivně odebrat z optického signálu jednotlivé kanály, případně množinu kanálů. Zároveň dokáže do signálu přidat kanály o stejných vlnových délkách jako byly kanály odebrané. Svým způsobem se jedná o optickou výhybku. Nejčastější využití těchto zařízení jsou kruhové sítě, případně přístupové sítě s liniovou strukturou, kde jsou ROADM muldexy umísťovány postupně od obslužného uzlu až ke koncovým muldexům [15]

AWG

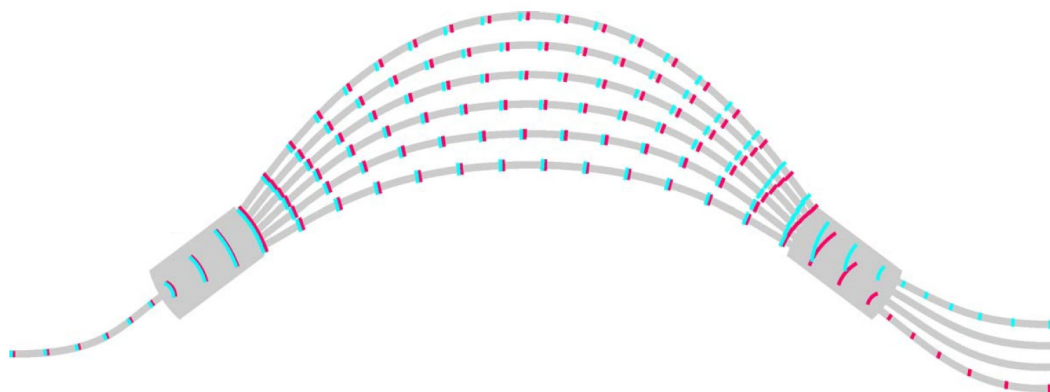
AWG (Arrayed Waveguide Grating) jsou zařízení které rozdělují signál ze vstupu do polí vlnovodů na výstupu na základě jejich vlnové délky. Na vstupní vlákno navazuje vlnovod značně širší, který se po krátké vzdálenosti rozděljuje do několika úzkých vlnovodů, které jsou stáčený do soustředných oblouků o různé délce. Odtud ústí vlnovody opět do širšího vlnovodu, který se po krátké vzdálenosti opět větví na výstupní vlnovody. AWG využívají různého fázového posuvu jednotlivých vlnových délek při průchodu úzkými vlnovody o různých délkách. Na výstupu těchto vlnovodů se i malé změny vlnové délky projeví na fázovém posuvu mezi jednotlivými vlnovody a výsledná výstupní ekvifázová plocha se pootočí o úhel úměrný změně vlnové délky a tato plocha je tak směřována do jiného výstupního vlnovodu [17].

Základní fungování AWG je možné popsat rovnicí 3.1

$$\Theta_{i,IN} = \frac{m}{n_s d} \left\{ \lambda_i - \lambda_c \left[1 + \frac{1}{n_{wg}} \frac{dn_{wg}}{d\lambda} (\lambda_i - \lambda_c) \right] \right\} - \Theta_{i,OUT}, \quad (3.1)$$

kde Θ_{IN} a Θ_{OUT} představuje úhel mezi střední osou a vstupními/výstupními vlnovody, λ_i je vlnová délka signálu, m je řád vlnovodu pro λ_i , λ_c je centrální vlnová délka, d je stupeň optické mřížky, n_s a n_{wg} jsou efektní indexy lomu [12].

Princip fungování AWG je vidět na obrázku 3.4

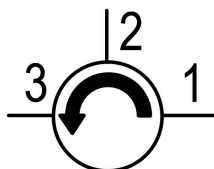


Obr. 3.4: Princip de/multiplexace vlnových délek pomocí metody AWG.

Použití AWG jako muldexu v optických sítích se jeví v dnešní době jako nejlepší. Hlavní předností je malý vložný útlum, který se pohybuje okolo 3dB a je jen minimálně závislý na počtu výstupních portů. Izolace mezi kanály se pak pohybuje okolo 30 dB.

3.2.2 Optické cirkulátory

Tato zařízení se používají pro oddělení signálu putujícího v síti různými směry. Jedná se většinou o tříportová zařízení fungující na principu, že signál přivedený na port první je odeslán druhým portem, signál přicházející na druhý port je odeslán na port třetí a signál přicházející na port třetí je odeslán na port první. Fungování je patrné ze symbolu označující optický cirkulátor, znázorněný na obrázku 3.5. Výhodou je vysoká izolace mezi porty 45 dB - 50 dB, útlum pod 1 dB, polarizační nezávislost a nízké přeslechy. Z důvodu odrazů je nutné použití APC úhlových konektorů [17].



Obr. 3.5: Symbol znázorňující optický cirkulátor.

Tato zařízení jsou většinou využívána v koncových jednotkách pro oddělení vysílaného a přijímaného signálu. Z vysílače je signál veden na první port cirkulátoru, odtud je předán na výstup druhého portu cirkulátoru a vysílán směrem k uživateli. V opačném směru je signál od uživatelů přijat na druhém portu cirkulátoru a předán na výstup třetího portu, kde směřuje k optickému přijímači.

3.2.3 Interleavry

Optický interleaver je tříportové zařízení sloužící ke sloučení dvou WDM signálů do jednoho kompozitního prokládaného signálu. Například dva DWDM signály s rastrem 100 GHz lze sloučit pomocí interleavru do jednoho DWDM signálu s odstupem jednotlivých kanálů 50 GHz [18]. Zařízení lze používat i v opačné funkci jako deinterleaver, kdy je signál s hustším rastrem rozdělen na sudé a liché kanály. Interleavry jsou například využívány pro rozdělení DWDM signálu v přístupových sítích, kdy je ve vlákne přenášen signál s rastrem například 100 GHz a liché kanály jsou využívány pro směr sestupný a sudé kanály pro směr vzestupný. Tím pádem je v každém směru využit signál s rastrem 200 GHz.

4 SIMULACE

Praktická část diplomové práce spočívá v návrhu sítí WDM-PON a GPON a porovnání jejich přenosových vlastností. K tomuto účelu byl zvolen software OptiSystem 9.0 od společnosti Optiwave. Software umožňuje simulovat přenosové vlastnosti optických sítí na fyzické vrstvě.

4.1 Síť GPON

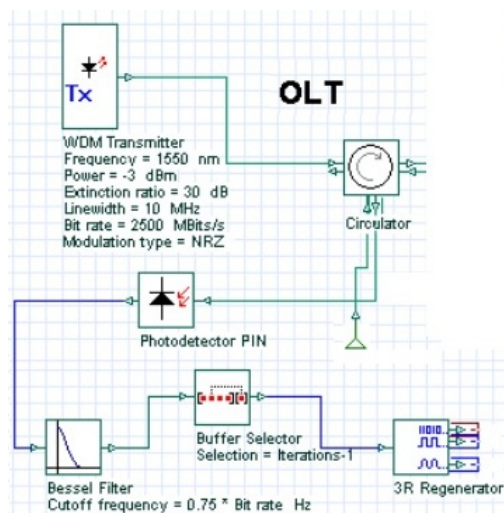
Síť GPON jsem z důvodu lepšího porovnání navrhl pro 4 a pro 8 koncových jednotek. V použitém simulačním programu lze nastavovat hodnoty pouze na úrovni fyzické vrstvy, tím pádem specifikace GPON je určena pouze na základě zvolené přenosové rychlosti, která je stanovena symetricky na 2,5 Gbit/s, na základě zvolené modulační NRZ přenášeného signálu a zvolené vlnové délky pro přenos, kdy je pro směr sestupný zvolena vlnová délka 1550 nm a pro směr vzestupný vlnová délka 1300 nm.

4.1.1 Optické linkové zakončení

Aktivní zařízení, které spojuje přístupovou síť s okolním světem se nazývá OLT. Rozvržení součástek v jednotce OLT je na obrázku 4.1. Je třeba v ní zajistit vysílání signálu do přístupové sítě. O to se v tomto případě stará WDM transmitter s jedním výstupním portem, zde se nastavuje přenosová rychlost, zvolena 2,5 Gbit/s, typ modulační NRZ a vysílací výkon byl zvolen na -3 dBm. Signál je dále přes cirkulátor veden ven do sítě. Ze strany uživatelů je signál opět přiváděn na cirkulátor a z něho veden na přijímací část OLT jednotky. O konverzi optického signálu na elektrický se stará PIN dioda. Elektrický signál je veden přes Besselův filtr, který je nastaven jako dolní propust pro odfiltrování vysokofrekvenčního šumu. Buffer selector je součástka, která slouží pouze pro účely simulace a ve směru od uživatele se stará o vybrání správné iterace. Poslední součástka 3R Regenerator slouží k obnově signálu do přijímatelné formy.

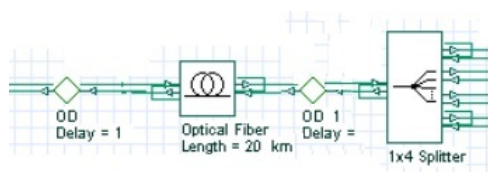
4.1.2 Optická distribuční síť

Část optické distribuční sítě je zde tvořena optickým vláknem o délce 20 km, nastavený měrný útlum je 0,2 dB/km a pasivním rozbočovačem. U rozbočovače se mění počet výstupních portů v závislosti na simulované síti. Základní rozvržení je zobrazeno na obrázku 4.2. Ve vzestupném směru je nutné použít mezi obousměrnými prvky sítě prvek Optical Delay, který slouží pouze pro účely simulace. Software si



Obr. 4.1: OLT jednotka navrhované GPON sítě.

hodnotu vložného útlumu u rozbočovače dopočítá sám na základě počtu výstupních portů.



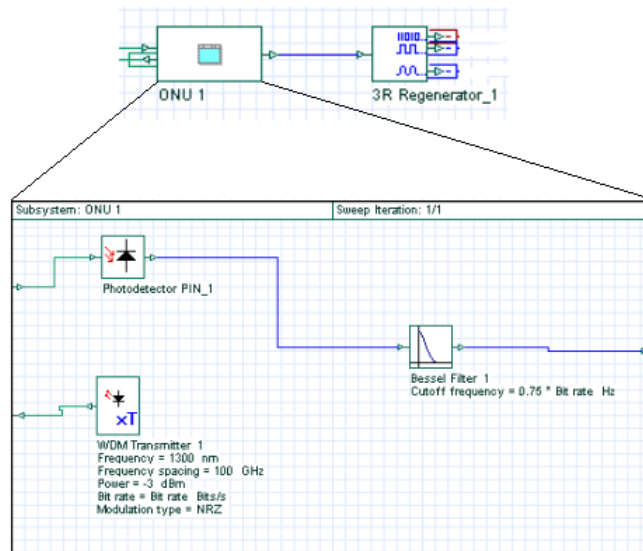
Obr. 4.2: Optická distribuční síť u GPON.

4.1.3 Koncová jednotka

Koncová jednotka na straně účastníka využívá téměř stejných v jednotce OLT. Je zde vynechán pouze Buffer Selector a cirkulátor. Cirkulátor pro potřeby simulování není potřeba, avšak v reálných podmínkách by bylo nutné použít nějaký oddělovač směru. WDM transceiver pro vysílání je naladěn na vlnovou délku 1310 nm určenou normou pro vzestupný směr. Hodnota výkonu, přenosová rychlost a typ modulace jsou schodné s vysílačem v jednotce OLT. Jednotka ONT je zobrazena na obrázku 4.3.

4.2 Síť WDM-PON

Návrh sítě WDM-PON byl stejně jako u GPON vytvořen pro srovnání ve verzi pro 4 koncové uživatele a 8 koncových uživatelů. Přenosové vlastnosti byly také

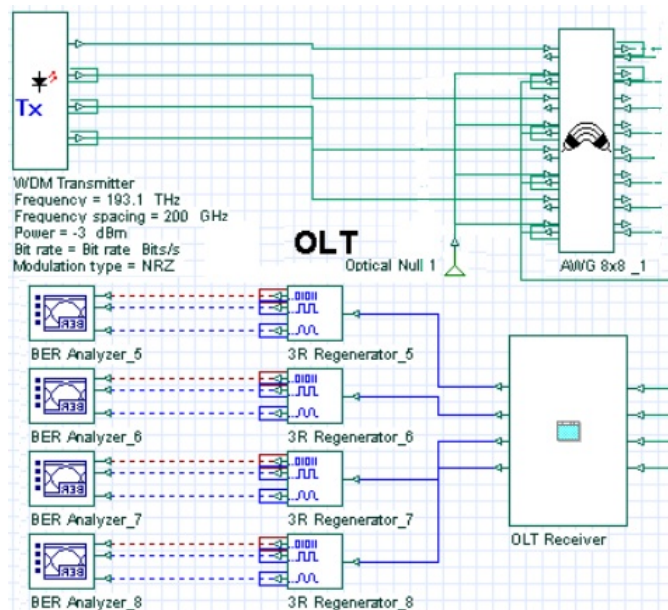


Obr. 4.3: Jednotka ONT pro síť GPON

voleny stejné jako u sítě GPON. To znamená výkon na vysílačích -3 dBm, typ modulace NRZ, přenosová rychlost 2,5 Gbit/s a vlákno o délce 20 km. Pro přenos jsou využívány signály o frekvencích začínajících na 193,1 THz pro směr sestupný a pro směr vzestupný je využíváno signálů s frekvencí začínající na 193,2 THz. Odstup mezi jednotlivými kanály je 200 GHz. Vlákem je tedy přenášen signál s kmitočtovým rastrem 100 GHz. Liché kanály jsou využívány pro sestupný směr a sudé kanály pro směr vzestupný.

4.2.1 Optické linkové zakončení

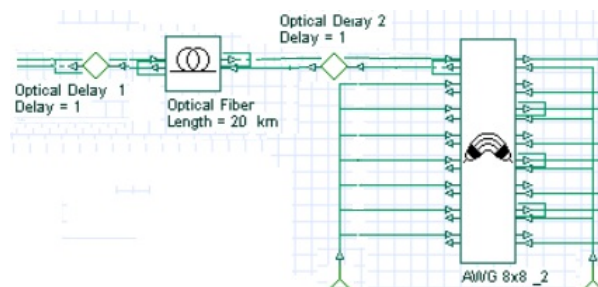
Jako vysílač je opět použit WDM Transmitter, tentokrát s více výstupními porty, v závislosti na počtu koncových účastníků, Pilotní frekvence na vysílači je nastavena na 193,1 THz a rastr vysílače nastaven na 200 GHz. Signál je z vysílače veden do AWG, kde je nutno nastavit pilotní frekvenci na 193,1 THz a rastr na 100 GHz, je to z důvodu správného fungování obousměrného provozu, aby bylo AWG schopno de/multiplexovat jak signál ve směru sestupném, tak vzestupném. Každý totiž pro přenos používá jiné vlnové délky. Vstupy AWG jsou tak zapojeny ob jeden port a nevyužité porty jsou ošetřeny optickou nulou. Přijímací část je stejná jako u sítě GPON, musí být pro každý příchozí kanál vytvořena zvlášť. Zapojení jednotky OLT pro WDM-PON síť se 4 koncovými uživateli je na obrázku 4.4



Obr. 4.4: OLT jednotka navrhované WDM-PON sítě.

4.2.2 Optická distribuční síť

Je tvořena stejným vláknem jako u sítě GPON to znamená 20 km a měrný útlum 0,2 dB/km. Namísto rozbočovače je signál rozdělen pomocí AWG odbočnice, ta je stejná jako je použita v OLT jednotce, pilotní frekvence na 193,1 THz a rastr nastaven na 100 GHz. Musí mít tedy dvojnásobný počet portů než je koncových jednotek. Zapojen je potom na straně koncových jednotek každý lichý výstupní port a každý sudý vstupní port. Ke každé koncové jednotce je veden jeden kanál ze signálu a od koncové jednotky je přijímán zase kanál s jinou frekvencí. Zapojení optické distribuční sítě pro WDM-PON je na obrázku 4.5



Obr. 4.5: Zapojení optické distribuční sítě pro WDM-PON.

4.2.3 Koncová jednotka

Jednotka na straně koncového účastníka je tvořena naprosto stejnými zařízeními jako je tomu u návrhu sítě GPON. Je pouze zvolena jiná vlnová délka, u první ONT jednotky je to 193,2 THz a u dalších je vždycky o 200 GHz vyšší. Přenosová rychlost, typ modulace i výstupní výkon jsou stejné jako v jednotce OLT.

4.3 Měřicí přístroje v Optisystému

Výsledky simulací můžeme zobrazit na měřících přístrojích, které nám Optisystem nabízí. V simulacích je použito především následujících měřících přístrojů. Zapojení měřících přístrojů je nejlépe vidět z celkového schéma sítě, které je umístěno v přílohách.

- PM - Power Meter.
- OSA - Optical Spectrum Analyzers.
- OTDV - Optical Time Domain Visualizer.
- WDM Analyzer.
- BER Analyzer.

4.3.1 Power Meter - PM

Jedná se pouze o zobrazení hodnoty výkonu optického signálu na daném místě v síti. Slouží spíše pro kontrolní účely.

4.3.2 Optický spektrální analyzátor - OSA

Tento přístroj nám umožňuje přehledně v grafu zobrazit výkon přenášeného signálu, na daném místě v síti, v závislosti na vlnové délce měřeného signálu. V klasických PON sítích nemá tento přístroj velkého využití, ale v sítích využívajících vlnové dělení je schopen zobrazit v grafu úroveň jednotlivých kanálů.

4.3.3 Vizualizace optického signálu v čase - OTDV

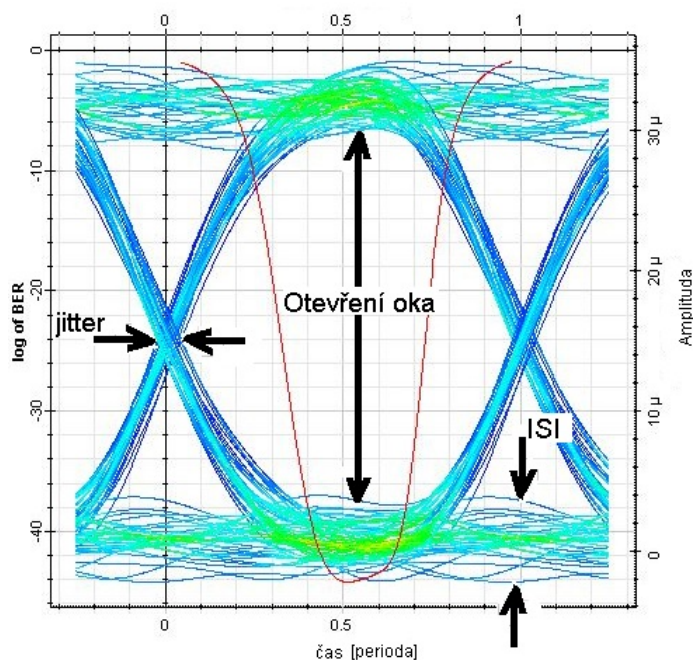
Tento přístroj zase dokáže v grafu zobrazit úroveň přenášeného signálu v čase. Je vhodný například pro zobrazení časového okna pro vysílání jednotlivých koncových stanic ONT.

4.3.4 WDM Analyzer

Do tabulky zapíše informace o přenášeném signálu. To znamená vlnovou délku jednotlivých kanálů, výkonovou úroveň každého z nich v místě měření, šum na dané vlnové délce a hodnotu odstupů signál-šum.

4.3.5 BER Analyzer

Hlavním faktorem pro posouzení kvality celé sítě je hodnota bitové chybovosti BER. Tato hodnota značí poměr chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů za určitou dobu. BER Analyzer zobrazuje hodnotu bitové chybovosti do grafu v závislosti na čase. BER Analyzer nám také umožňuje zobrazit diagram oka. Ten představuje superpozici navzájem překrytých bitů v signálu. Z diagramu oka je potom možné vyčíst hodnotu jitteru, což je hodnota kolísání zpoždění jednotlivých bitů a parametr ISI (InterSymbol Interference - mezisymbolové interference), ten způsobuje překrývání jednotlivých modulačních impulsů [19]. Obecně platí, že čím více je oko otevřené, je kvalita přijatého signálu vyšší. Diagram oka s vyznačenými parametry je zobrazen na obrázku 4.6



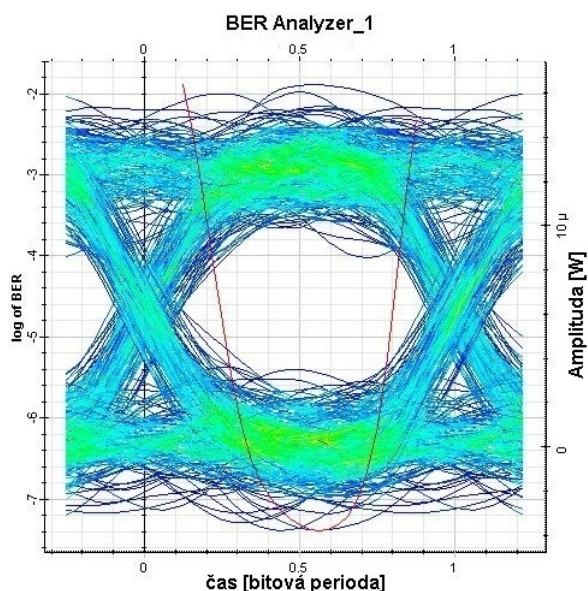
Obr. 4.6: Diagram oka s popisem.

4.4 Výsledky simulací

Hlavní pozornost při srovnání přenosových parametrů byla kladena na bitovou chybovost přijímaného signálu a to v obou směrech. Tento parametr nejlépe vystihuje kvalitu navrhované sítě, protože ho ovlivňuje většina negativních působení v síti, jako je útlum, disperze, šum a podobně. Pro podrobnější získání informací bylo použito náměrů pomocí optického spektrálního analyzátoru (OSA), zobrazení optického signálu v čase pomocí vizualizéru rozložení optického signálu v čase (OTDV) a u WDM sítě také zobrazení úrovní jednotlivých kanálů pomocí WDM analyzátoru.

4.4.1 Srovnání hodnot bitové chybovosti a diagramů oka

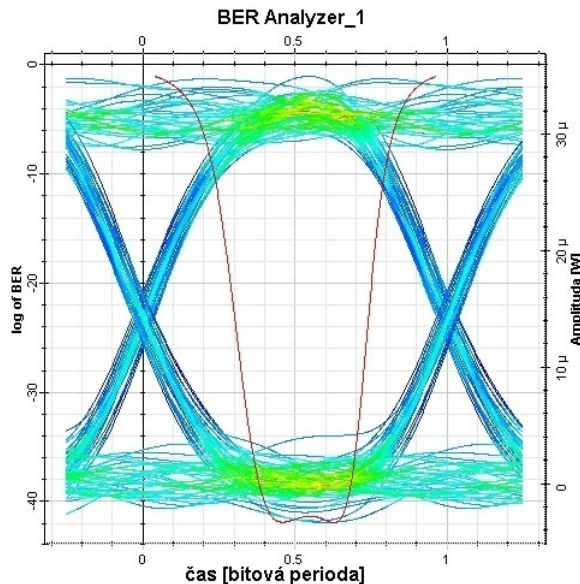
Nejhorší hodnoty bitové chybovosti byly nasimulovány v síti GPON s 8 koncovými účastníky. Tato hodnota je na straně koncové jednotky ONT rovna $BER = 4,1 \cdot 10^{-8}$ a na straně jednotky OLT je hodnota rovna $BER = 2,6 \cdot 10^{-13}$. Při těchto hodnotách bitové chybovosti, je přijímač schopen bez problémů přijmout příchozí signál s dostatečnou rezervou v bitové chybovosti. V případě horších hodnot bitové chybovosti je možné navíc použít dopředné korekce chyb a opravit špatně přijaté bity například pomocí FEC využívající Reed-Solomonovy kódy. Výsledky BER analyzátoru včetně diagramu oka na straně ONT sítě GPON jsou na obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT 1 v síti GPON, s 8 koncovými uživateli.

Pro srovnání hodnoty bitové chybovosti u sítě WDM-PON s 8 koncovými uživateli je na straně jednotky ONT rovna $BER = 1,2 \cdot 10^{-42}$ a na straně jednotky

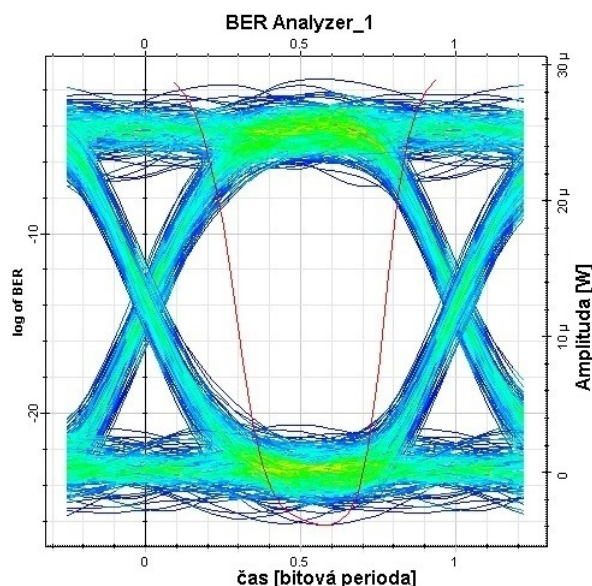
OLT je rovna $BER = 1,9 \cdot 10^{-43}$. Tyto hodnoty jsou značně nízké a přijímač by neměl problém takový signál přijmout i bez použití dopředné korekce chyb (FEC). Nízkých hodnot bitové chybovosti je docíleno především díky nízkému útlumu trasy, tím pádem na přijímač přichází signál o vyšším výkonu. Nižšího útlumu u WDM sítí je dosaženo používáním AWG odbočnice, jejíž vložný útlum se pohybuje okolo 3 dB a na rozdíl od rozbočovače její vložný útlum téměř nevzrůstá s počtem výstupních portů. Jak bude ukázáno níže, v návrhu WDM-PON se 4 koncovými účastníky je AWG odbočnice s polovinou portů a hodnoty BER jsou téměř stejné jako u WDM-PON s 8 účastníky. Již v síti s pouhými 8 koncovými uživateli můžeme navýšit například délku trasy o 25 km a hodnoty BER jsou téměř stejné se sítí GPON. Vložný útlum vlákna dlouhého 25 km je roven $\alpha = (0,2 \cdot 25) = 5$ dB, kde 0,2 dB/km je hodnota měrného útlumu vlákna na kilometr pro vlnovou délku 1550 nm. Přidané vlákno vnese tedy do trasy dalších 5 dB. Hodnota útlumu 8 portového rozbočovače je rovna přibližně 10,6 dB. Rozdíl vložného útlumu při použití rozbočovače oproti AWG odbočnici činí přibližně 7,6 dB. Je třeba však uvažovat i další negativní jevy působící ve vláknech. Hodnoty bitové chybovosti pro WDM-PON síť o délce 45 km jsou rovny $BER = 3,5 \cdot 10^{-6}$ u jednotky ONT a u jednotky OLT je to $BER = 8,9 \cdot 10^{-7}$. Na obrázku 4.8 je zobrazen diagram oka a bitová chybovost u koncové jednotky ONT v síti WDM-PON pro 8 koncových účastníků a 20 km vlákna.



Obr. 4.8: Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT v síti WDM-PON, s 8 koncovými uživateli a 20 km vlákna.

Další sítí je síť GPON se 4 koncovými uživateli. Zde není útlum rozbočovače výrazně větší než útlum AWG odbočnice, tím pádem není výsledný rozdíl bitové

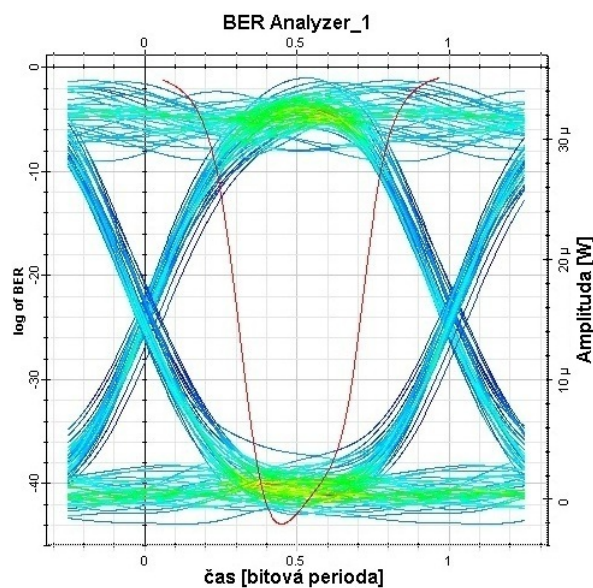
chybovosti tak velký. Tabulkově je hodnota vložného útlumu 4 portového rozbočovače rovna asi 6,8 dB. Hodnoty bitové chybovosti jsou v tomto případě také na velice dobré úrovni a umožňují nám částečné změny v síti. Například prodloužením přenosové cesty. Graf bitové chybovosti a diagram oka měřeny u jednotky ONT jsou zobrazeny na obrázku 4.9.



Obr. 4.9: Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT v síti GPON se 4 koncovými uživateli a 20 km vlákna.

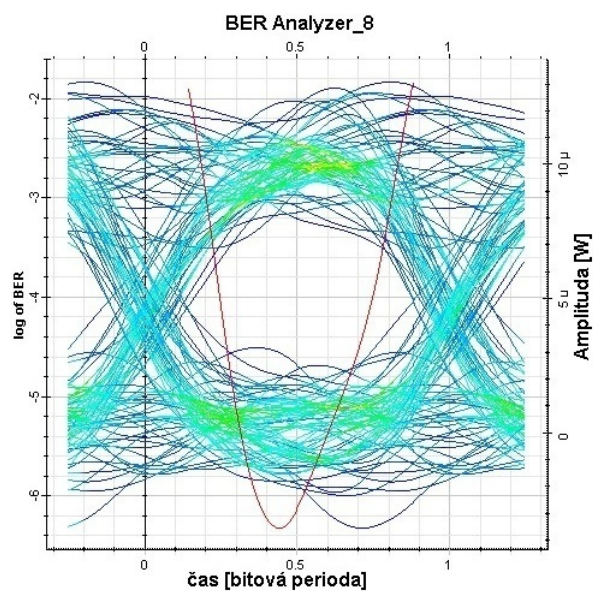
Poslední porovnávanou sítí je WDM-PON se 4 koncovými uživateli, ve srovnání se sítí WDM-PON s 8 koncovými účastníky jsou hodnoty bitové chybovosti velice podobné. Na straně ONT je hodnota bitové chybovosti rovna $BER = 1,3 \cdot 10^{-44}$ a na straně jednotky OLT je to $BER = 6,3 \cdot 10^{-45}$. Je patrné, že počet výstupních portů AWG odbočnice nemá na výsledný vložný útlum téměř žádný vliv. V porovnání s GPON sítí se 4 koncovými uživateli nedosahuje tato WDM-PON síť tak dobrých výsledků jak tomu bylo u sítí s 8 koncovými uživateli. Je tedy patrné, že pro zvyšující se počet koncových účastníků je výhodnější použití WDM technologie a AWG odbočnice pro rozdělení. Na obrázku 4.10 je graf bitové chybovosti společně s diagramem oka pro síť WDM-PON se 4 koncovými uživateli na straně ONT jednotky.

Co se týče diagramu oka, mají obě GPON sítě viditelněji horší výsledky jak u kolísání zpoždění tak u mezisymbolové interference. Při srovnání diagramu oka z ONT jednotky v síti WDM-PON s 8 koncovými uživateli a při délce vlákna 45 km, obrázek 4.11, kdy hodnoty bitové chybovosti dosahovaly přibližně stejných výsledků



Obr. 4.10: Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT v síti WDM-PON se 4 koncovými uživateli a 20 km vlákna.

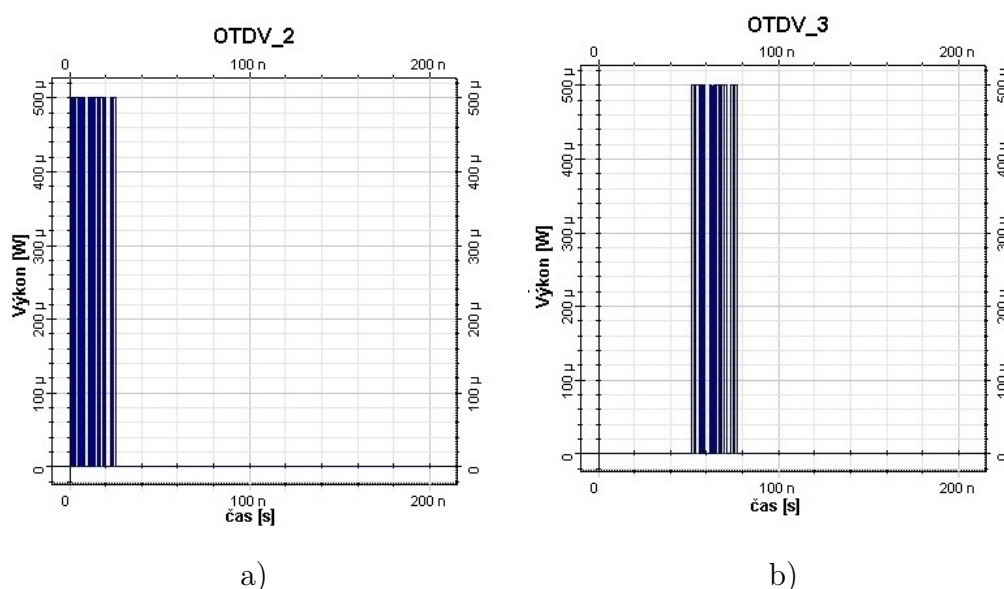
jako u sítě GPON s 8 koncovými uživateli, je patrné, že na hodnoty kolísání zpoždění a mezisymbolové interference má vliv spíše použité vlákno a jeho délka.



Obr. 4.11: Diagram oka a bitová chybovost na jednotce ONT v síti WDM-PON s 8 koncovými uživateli a 45 km vlákna.

4.4.2 Měření na trase

Na trase sítě bylo prováděno měření pomocí optických spektrálních analyzátorů (OSA) a pomocí vizualizéru rozložení optického signálu v čase (OTDV). Spektrální analyzátor je vhodnější použít u sítí s vlnovým dělením a naopak zobrazení pomocí OTDV je účelnější v sítích s časovým dělením. Pro srovnání jednotlivých parametrů je v simulacích použito obou měřících nástrojů pro oba typy sítě. Na obrázku 4.12 jsou zobrazeny signály ve vzestupném směru vycházející z jednotek ONT v síti GPON. Jednotlivé jednotky mají pevně daný časový okamžik kdy mohou vysílat. V síti s 8 koncovými uživateli tak každá jednotka může zabrat pouze 1/8 z celkové vysílací kapacity.

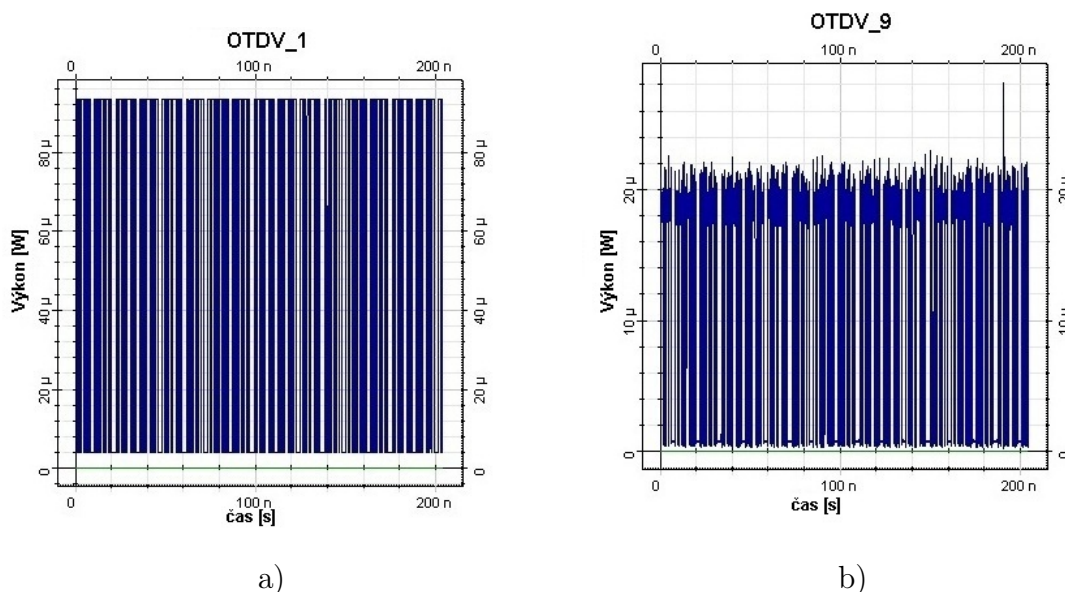


Obr. 4.12: a) Výstupní signál z ONT 1 v síti GPON pro 8 koncových uživatelů, b) Výstupní signál z ONT 3 v síti GPON pro 8 koncových uživatelů.

Signály z jednotlivých ONT jednotek na sebe v rozbočovači navazují, obrázek 4.13 vpravo), a zbytkem sítě proudí kontinuální datový tok, obrázek 4.13 vlevo. Na obrázcích 4.13 je také vidět výkonový pokles signálu po průchodu rozbočovačem a po průchodu vláknem a cirkulátorem je vidět také značné zašumění signálu.

V opačném směru proudí kontinuální datový tok až ke koncovým jednotkám a tam, na základě informací z vyšších vrstev, je vybrána pouze část určená pro danou koncovou jednotku. Všechny koncové jednotky jsou tak schopny přijmout veškerý datový tok v sestupném směru. To je obzvláště z bezpečnostního hlediska problém, který se řeší například šifrováním.

V sítích s vlnovým dělením jsou tyto problémy odstraněny díky tomu, že každá jednotka komunikuje na vlastní vlnové délce a to jak v sestupném směru, tak ve směru

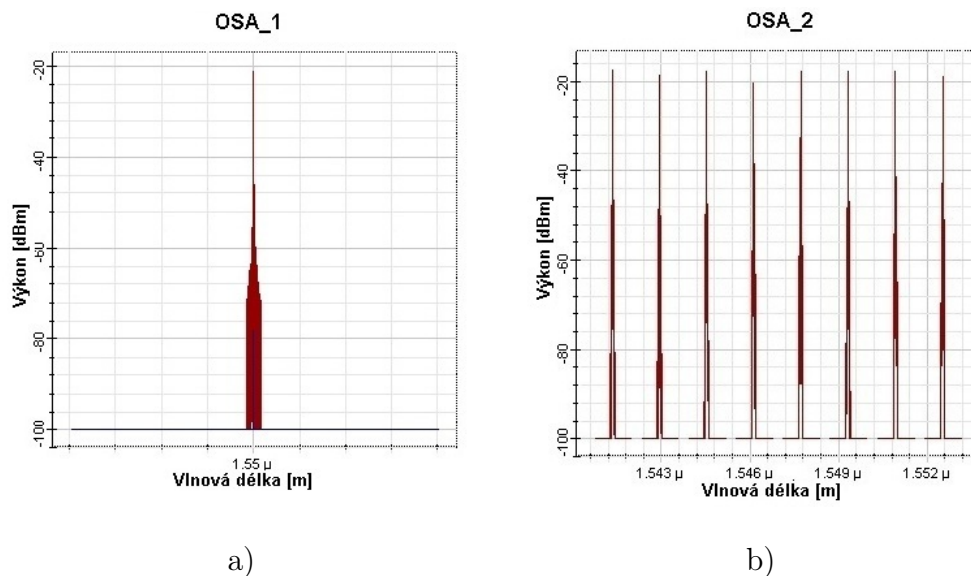


Obr. 4.13: a) Signál ve vzestupném směru v síti GPON pro 8 koncových uživatelů, měřeno na výstupu z rozbočovače, b) signál ve vzestupném směru v síti GPON pro 8 koncových uživatelů, měřeno na výstupu z cirkulátoru.

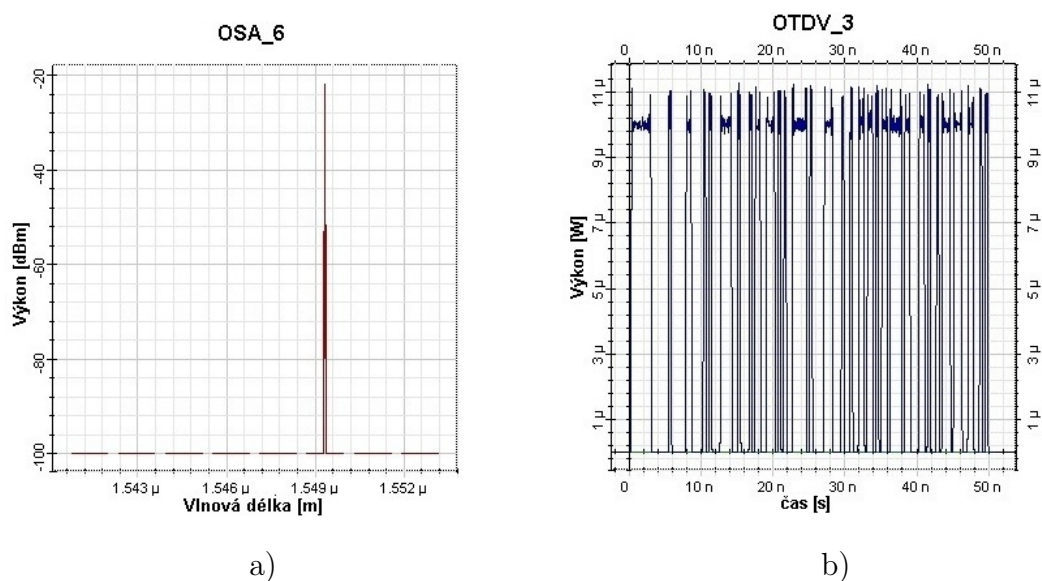
vzestupném. V sestupném směru jsou v AWG jednotlivé kanály vyděleny a posílány pouze k dané koncové jednotce. Na obrázku 4.14 vlevo je zobrazen náměr pomocí optického spektrálního analyzátoru v sestupném směru pro síť GPON a pro síť WDM-PON vpravo. Oba signály jsou měřeny na výstupu z vlákna.

Na obrázku 4.15 je potom vidět jeden kanál na výstupu AWG, vlevo jeho náměr na optickém spektrálním analyzátoru a vpravo zobrazení signálu v čase pomocí OTDV. Ve spektrálním analyzátoru jsou vidět potlačené kanály a jeden kanál patřící dané koncové jednotce. Na OTDV můžeme vidět zašumění signálu po průchodu sítí. K jednotce ONT tak přichází kontinuální tok dat po celou dobu vysílání, podobně jak je tomu u sítí s časovým dělením, zde však přichází tok dat je pouze její vlastní díky vlnovému dělení.

Ve směru vzestupném je také pro každou jednotku zvolen vlastní kanál na kterém komunikuje. Proto nemusí mít jednotky ONT určen pevně daný časový úsek jak je tomu u sítí s časovým dělením. Všechny jednotky tak mohou plně využít svoji přenosovou kapacitu. Pro srovnání s výstupy z GPON sítě jsou na obrázku 4.16 zobrazeny signály ve vzestupném směru od jednotek ONT 1 a ONT 3. Na rozdíl od sítě GPON je signál vysílán po celou dobu simulace. Vlastní přenosový kanál umožňuje koncovým jednotkám plné využití přenosové kapacity sítě. V porovnání se sítí GPON je síť WDM-PON schopna koncovým uživatelům poskytnout až 8-krát vyšší rychlost.

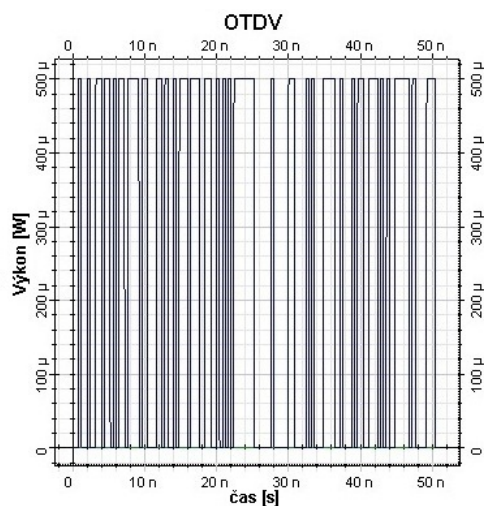


Obr. 4.14: a) Signál v sestupném směru v síti GPON pro 8 koncových uživatelů, měřeno na výstupu z vlákna, b) signál v sestupném směru v síti WDM-PON pro 8 koncových uživatelů, měřeno na výstupu z vlákna.

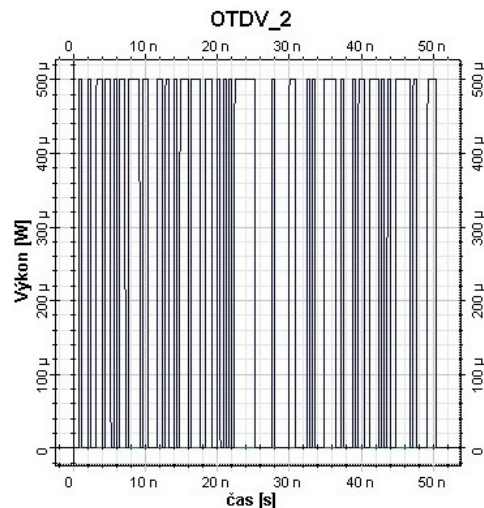


Obr. 4.15: a) Náměr OSA na signálu v sestupném směru k jednotce ONT 3 v síti WDM-PON b) signál v sestupném směru k jednotce ONT 3 v síti WDM-PON.

V AWG jsou potom signály z jednotlivých koncových jednotek multiplexovány do jednoho a odesílány směrem k jednotce OLT. Na obrázku 4.17 jsou zobrazeny náměry z optického spektrálního analyzátoru ve vzestupném směru. Měřeny na výstupu z AWG, obrázek vlevo a na výstupu z vlákna obrázek vpravo. V přijímači OLT musí mít každý kanál vlastní přijímací část. Kanály se dělí v AWG, které je obsažené v



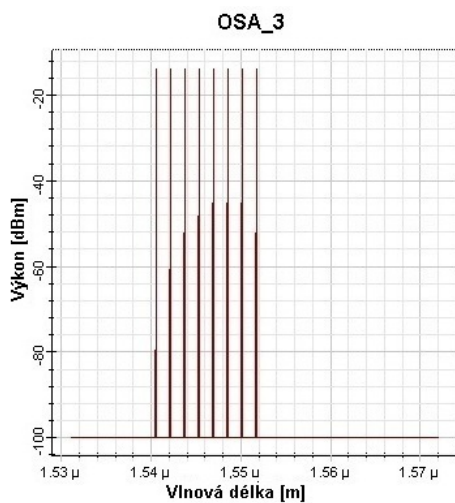
a)



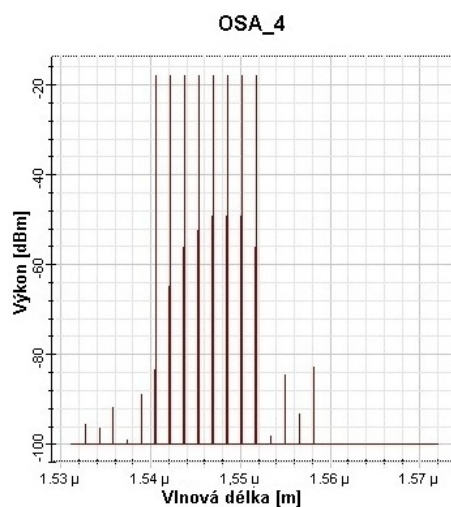
b)

Obr. 4.16: a) Výstupní signál z ONT 1 v síti WDM-PON pro 8 koncových uživatelů, b) výstupní signál z ONT 3 v síti WDM-PON pro 8 koncových uživatelů.

OLT jednotce.



a)



b)

Obr. 4.17: a) Signál ve vzestupném směru v síti WDM-PON s 8 koncovými uživateli, výstup z AWG, b) signál ve vzestupném směru v síti WDM-PON s 8 koncovými uživateli, vstup do OLT.

5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo srovnání pasivních optických přístupových sítí založených na časovém dělení TDM a založených na vlnovém dělení WDM. V simulačním software Optisystem 9.0 byly navrženy čtyři tyto sítě. Dvě založené na principu časového dělení a dvě na principu dělení vlnového. Od každého typu sítě byly vytvořeny verze pro 4 a pro 8 koncových uživatelů, pro srovnání vlivu počtu koncových uživatelů na parametry sítě. Teoretická část diplomové práce měla za úkol nastudování jednotlivých standardů používaných pro přenos v pasivních optických sítích. V jednotlivých kapitolách jsou popsány parametry standardů BPON, GPON, EPON a 10GEPON. Popis se zaměřil především na přenosové parametry jako jsou přenosová rychlost na fyzické vrstvě, maximální fyzická vzdálenost, rozbočovací poměr ke koncovým jednotkám, zvolené vlnové délky pro přenos při použití vlnového dělení. Zvláštní pozornost byla věnována přenosovým protokolům použitých v jednotlivých standardech. V případě protokolů ATM a Ethernet byl popis zaměřen především na rozdíly těchto protokolů použitých pro přenos v optických sítích a protokolů pro přenos v běžných sítích. Podrobně byly popsány také přenosové rámce, včetně jednotlivých částí jejich záhlaví. Na základě nastudovaných informací o přenosových parametrech byl naznačen výpočet užitečné přenosové rychlosti. Další část byla věnována nastudování nasazení vlnového dělení do pasivních optických přístupových sítí. Byly popsány jednotlivé druhy vlnového dělení, jako je hrubý vlnový multiplex CWDM a hustý vlnový multiplex DWDM a také pasivní součástky používané v optických sítích s vlnovým dělením. Na konci teoretické části jsou nastíněny možnosti přenosu televizního signálu v PON sítích.

V simulacích dosahovaly obě sítě založené na vlnovém dělení podstatně lepších parametrů oproti sítím založeným na časovém dělení. Hodnoty bitové chybovosti byly v případě WDM-PON sítě s 8 koncovými uživateli o 10 řádů lepší oproti síti založené na technologii GPON se 4 koncovými uživateli. Tohle je způsobeno především použitím AWG odbočnice u sítí s vlnovým dělením, která má vložený útlum pohybuující se kolem 3 dB a vložený útlum je téměř nezávislý na počtu výstupních portů. Na rozdíl od rozbočovače, který se používá v sítích s časovým dělením a už při rozbočení 1:4 má vložený útlum 6,8 dB a s rostoucím počtem výstupních portů hodnota vloženého útlumu výrazně stoupá. To samozřejmě značně degraduje signál a tím pádem není možné použít například delších přenosových tras. Další nevýhodou sítí založených na časovém dělení, je samotné časové dělení. Koncové jednotky se musí dělit o přenosovou kapacitu sítě, to znamená s přibývajícím počtem koncových stanic menší přenosová kapacita pro každou z nich. U sítí s vlnovým dělením je využito samostatného kanálu pro každou koncovou jednotku a to zvlášť pro každý směr, a proto se nemusí dělit s ostatními koncovými jednotkami o přidělenou přenosovou

kapacitu. Jedinou nevýhodou sítí s vlnovým dělením v dnešní době, je cena dostupných součástek. Do budoucna je tato technologie rozhodně perspektivní, nabízí se však otázka jestli se již v dnešní době vyplatí investovat do přístupových sítí s vlnovým dělením. Vývoj v posledních letech zaznamenal velký růst této technologie, co se týče využití laserů a s nimi spojenými možnostmi v rozestupech mezi jednotlivými kanály. V přístupových sítích je v dnešní době využíván především rastr CWDM s rozestupem mezi jednotlivými kanály 20 nm. V experimentálních podmínkách je však už dnes testován rastr s rozestupem mezi kanály pouze 0,1 nm.

LITERATURA

- [1] BARTELL, J. *GPON's Dynamic Bandwidth Assignment (DBA)*. *FT-TXtra* [online]. 16.12.2009, 2009, [cit. 14.12.2010]. Dostupné z URL: <<http://www.fttxtra.com>>.
- [2] BROUČEK, J.; KOTAS, R. *ROADM optické WDM multiplexory a jejich měření pomocí OSA*. *Profiber* [online]. 2010, [cit. 8.5.2011]. Dostupné z URL: <<http://www.profiber.eu>>.
- [3] CLEARY, D. *EPON or GPON. Optical Solutions*. White paper
- [4] FILKA, M. *Optoelectronics for telecommunications and informations*. Texas: Inc., Publishers, 2009. ISBN 978-0-615-33185-0.
- [5] GIRARD, A. *FTTx PON Technology and Testing*. EXFO Electro-Engineering Inc., Quebec City, Canada, 2005.
- [6] HLADKÝ, M. *VŠB Ostrava Experimentální pracoviště WDM PON*. *Profiber* [online]. 2010, [cit. 8.5.2011]. Dostupné z URL: <<http://www.profiber.eu>>.
- [7] KREJČÍ, J.; LAFATA, P. *Současné a budoucí možnosti řešení přístupové sítě pro IPTV*. *Elektrorevue* [online]. 2010, [cit. 10.12.2010]. ISSN 1213-1539. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz>>.
- [8] LAFATA, P. *Pasivní optické sítě s rychlostí 10 Gbit/s* [online]. 2011, [cit. 3.5.2011]. ISSN 1214-9675. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz>>.
- [9] LAFATA, P.; VODRÁŽKA, J. *Pasivní optická síť GPON*. *Access server* [online]. 2009, roč. 7. [cit. 8.12.2010]. ISSN 1214-9675. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz>>.
- [10] LAFATA, P.; VODRÁŽKA, J. *Pasivní optická přístupová síť EPON*. *Access server* [online]. 2009, roč. 7. [cit. 8.12.2010]. ISSN 1214-9675. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz>>.
- [11] LAFATA, P.; VODRÁŽKA, J. *Pasivní optická síť 10GE PON*. *Elektrorevue* [online]. 2010, [cit. 8.12.2010]. ISSN 1213-1539. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz>>.
- [12] LEIJTENS, X. J. M.; KUHLOW, B. *Filters in Fibre Optics*. Berlin : Springer, 2006. *Springer Series in Optical Sciences*, s. 125-187. ISBN 3-540-31769-4.
- [13] MOLNÁR, K. *BHWS-ATM. Poznámky k přednáškám* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.utko.feec.vutbr.cz/molnar>>.

- [14] PETERKA, J. *Jak funguje IPTV?* [online]. poslední aktualizace 24. 8. 2006 [cit. 10. 12. 2010]. Dostupné z URL: <<http://www.lupa.cz>>.
- [15] PILAŘ, J. *Vývojové trendy rekonfigurovatelných optických add/drop multiplexerů. WDM Systems SUMMIT 2010* [online]. 2010, 1. vydání, [cit. 8.5.2011]. Dostupné z URL: <<http://www.wdmsummit.cz>>.
- [16] ŠIFTA, R. *Návrh sítě FTTH* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [17] ŠIFTA, R. *DWDM v přístupových sítích. Brno* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 44 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [18] ŠÍMA, J; *DWDM pro metropolitní sítě. rlc.cz* [online]. 2010, [cit. 8.5.2011]. Dostupné z URL: <<http://www.rlc.cz>>.
- [19] TEJKAL, V.; FILKA, M.; REICHERT, P.; ŠPORIK, J *Dvoustavové modulační formáty v optických přístupových sítích. Advances in Electrical and Electronic Engineering - internetový časopis* [online]. 2010, [cit. 8.5.2011]. č. 4, s. 96-101. ISSN: 1804- 3119 Dostupné z URL: <<http://advances.uniza.sk/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f_{vz} vzorkovací kmitocet

1000BASE-PX10 Ethernetový standard

1000BASE-PX20 Ethernetový standard

10GEPON Gigabit Ethernet Capable PON – standard PON

APON ATM Passive Optical Network – standard PON

ATM Asynchronous Transfer Mode – asynchronní přenosový mód

AWG Arrayed Waveguide Grating – vlnovody uspořádané do mřížky

BER Bit Error Rate – bitová chybovost

BPON Broadband PON – standard PON

BW BandWidth – šířka pásma

CATV Cable Analog Television – kabelová TV

CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection – metoda mnohonásobného přístupu s detekcí kolize

CWDM Coarse Wavelength Division Multiplex – hrubý vlnový multiplex

DA Destination Address – cílová adresa

DBA Dynamic Bandwidth Assignment – dynamické přidělování šířky pásma

DBR Dynamic Bandwidth Report – zpráva o dynamickém přidělování šířky pásma

DFB Disturbed FeedBack – typ laseru

DVD Digital Video Disc – typ záznamového média

DWDM Dense Wavelength Division Multiplex – hustý vlnový multiplex

EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier – erbiem dopovaný optický zesilovač

EPON Ethernet PON – standard PON

FEC Forward Error Correction – dopředná oprava chyb

FP Fabry-Perot – typ laseru

FSC zabezpečovací pole rámce

GATE zpráva definující časový okamžik pro vysílání ONT

GEM GPON Encapsulation Method – metoda přenosu ATM buněk a Ethernet rámců v GPON

GEPON Gigabit Ethernet Capable PON – standard PON

GPON Gigabit Capable PON – standard PON

GTC GPON Transmission Convergence Layer – vrstva modelu GPON

GTC-A GTC Adaptation sublayer – podvrstva vrstvy GTC

GTC-F GTC Framing sublayer – podvrstva vrstvy GTC

HEC Header Error Correction – část hlavičky GPON rámce

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers – Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství

IP Internet Protocol – internetový protokol

IPTV TV over Internet Protocol – přepínané video

ISI Intersymbol interference – mezisymbolová interference

ITU International Telecommunication Union – mezinárodní telekomunikační unie

LAN Local Area Network – lokální síť

LLID Logical Link ID – identifikační číslo ONU v záhlaví rámce

MAC Media Access Control – jedinečný identifikátor síťového zařízení

MP2MP MultiPoint to MultiPoint – typ komunikace

MPCP Multi-Point Control Protocol – řídicí protokol pro standard EPON

MPEG-2 Motion Pictures Experts Group-2 – komprimační datový formát

MPEG-4 Motion Pictures Experts Group-4 – komprimační datový formát

NGA1 Next Generation Access 1 – přístupové sítě další generace

NGA2 Next Generation Access 2 – přístupové sítě další generace

NNI Network to Network Interface – rozhraní mezi dvěma ATM přepínači

NSR-DBA Non Status Reporting DBA – metoda přidělování přenosové kapacity

ODN Optical Distribution Network – optická distribuční síť

OLT Optical Line Terminate – Optické linkové zakončení

OMCI ONU Management and Control Interface – systému služebních zpráv a řízení

ONU Optical Network Unit – optické ukončovací jednotky

ONT Optical Network Terminal – optické síťové zakončení

OSA Optical Spektrum Analyzer – optický spektrální analyzátor

OTDV Optical Time Domain Visualizer – vizualizér rozložení optického signálu v čase

P2MP Poin - To - MultiPoint – spojení bod - více bodů

P2P Poin - To - Point – spojení bod - bod

P2P Poin - To - Point – spojení bod - bod

PCB Physical Control Block – blok záhlaví GEM rámce

PLEND Payload Length field – položka v GEM rámci

PLI položka v GEM rámci

PLO Physical Layer Overhead – pole zajišťující rámcovou synchronizaci

PLOAM Physical Layer Operations, Administration and Maintenance – řídicí buňka

PLS Power Levelling Sequence – část GPON rámce

PM Power Meter – měřič výkonu

PON Passive Optical Network – pasivní optická síť

QoS Quality of Service – kvalita služeb

REPORT Odpověď na zprávu GATE

ROADM Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer – rekonfigurovatelný add/drop multiplexer

SA Source Address – adresa zdroje

SBA Static Bandwidth Allocation – statické přidělování šířky pásma

SR-DBA Status Reporting DBA – zpráva pro přidělování přístupu

T-CONT záhlaví přenosového rámce GPON

TDM Time-division multiplexing – časové dělení

TV TeleVision – televize

UDWDM Ultra Dense Wavelength Division Multiplex – ultra hustý vlnový multiplex

UNI User Network Interface – typ rozhraní

VCI Virtual Circuit Identifier – identifikátor virtuálního okruhu

VoD Video on Demand – video na vyžádání

VPI Virtual Path Identifier – identifikátor virtuálního spojení

WDM Wavelength Division Multiplex – vlnový multiplex

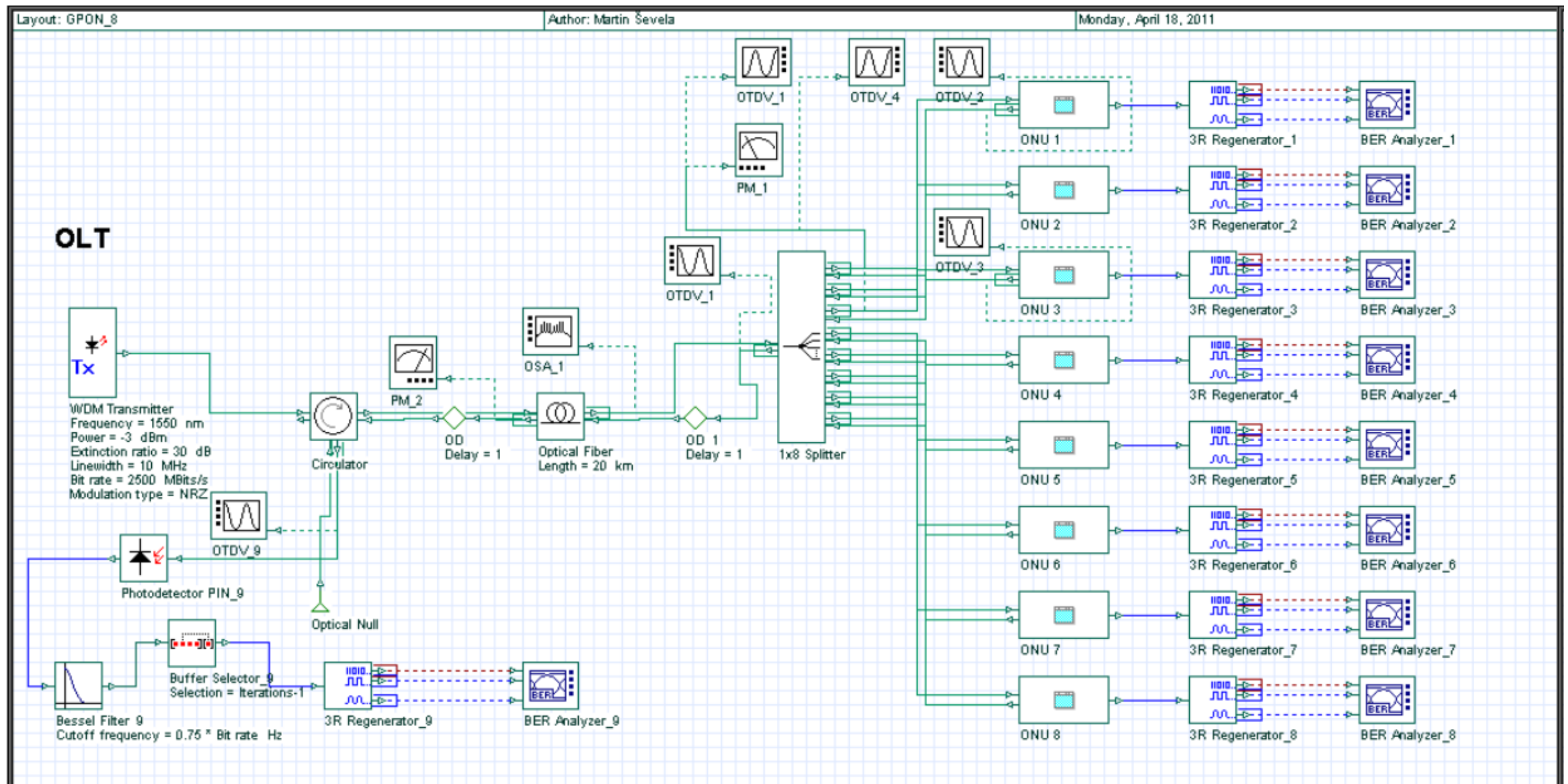
WWDM Wide Wavelength Division Multiplex – široký vlnový multiplex

XGPON X Gigabit Capable PON – standard PON

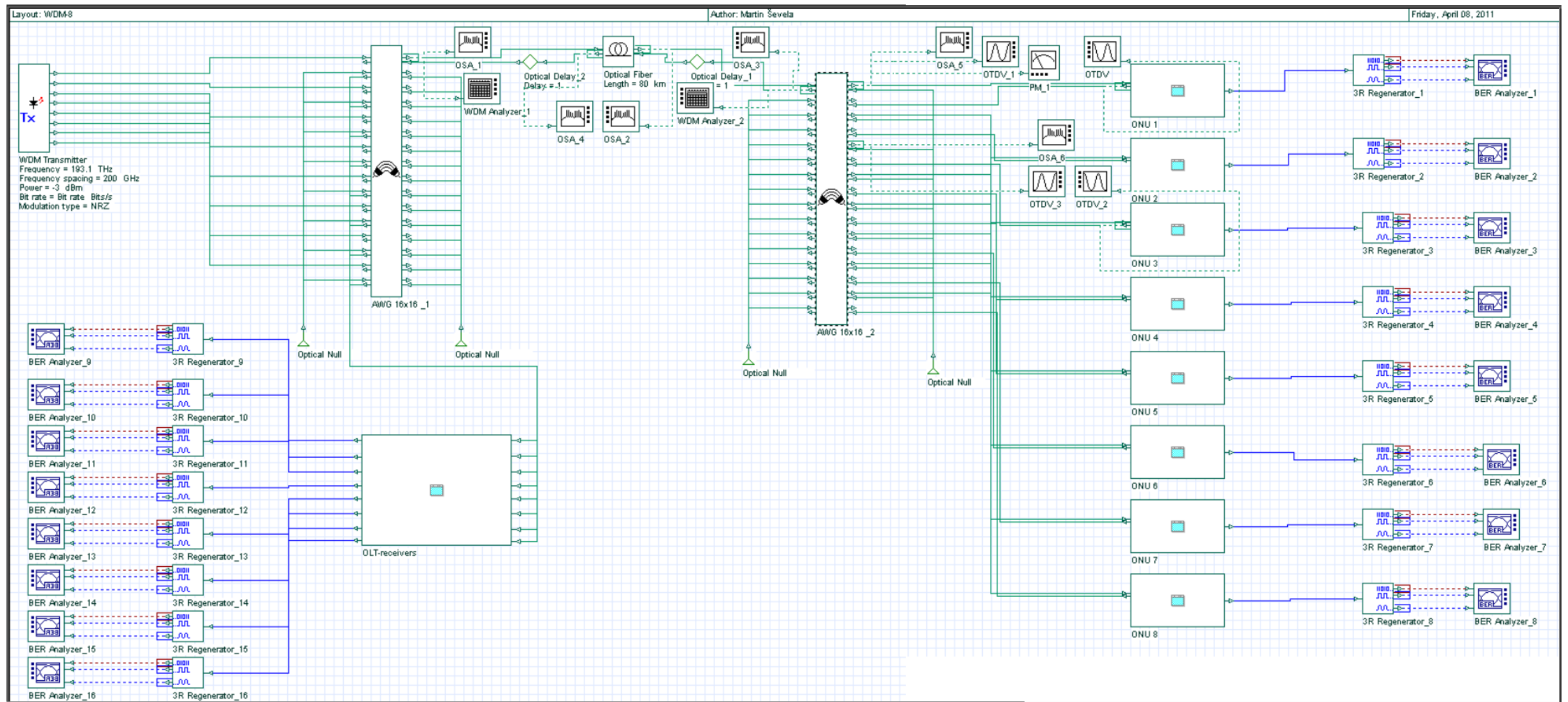
Seznam příloh

- A** Celkové schéma zapojení simulované sítě GPON s 8 koncovými stanicemi
- B** Celkové schéma zapojení simulované sítě WDM-PON s 8 koncovými stanicemi
- C** Celkové schéma zapojení simulované sítě GPON se 4 koncovými stanicemi
- D** Celkové schéma zapojení simulované sítě WDM-PON se 4 koncovými stanicemi
- E** Obsah přiloženého CD
 - E.1** Elektronická verze práce
 - E.2** Přílohy A,B,C a D v elektronické podobě

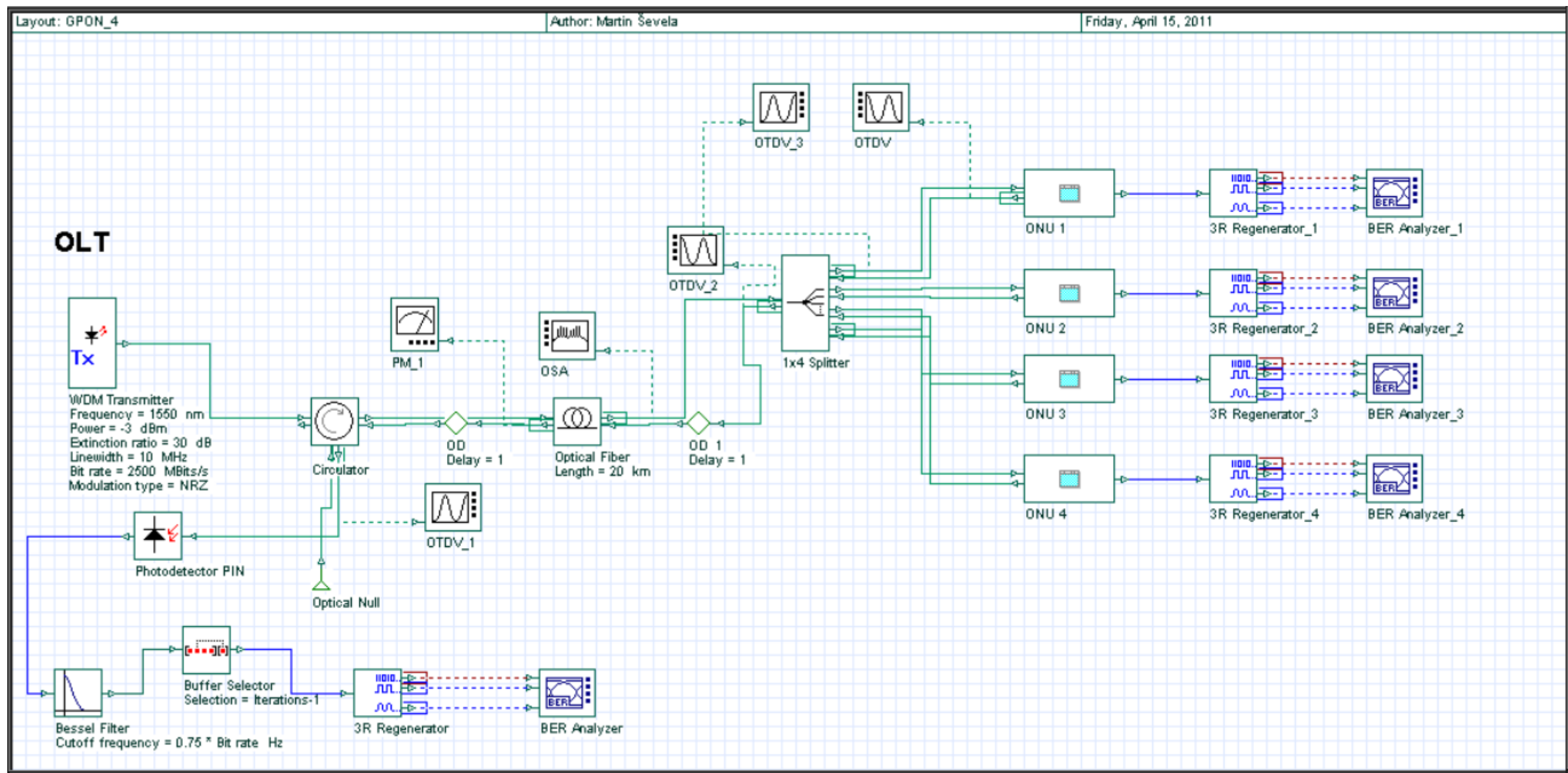
Příloha A



Příloha B



Příloha C



Příloha C

